

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY**  
**UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA**



جامعة باجي مختار عنابة

**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

## **MEMOIRE**

**PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**

### **INTITULE**

**ETUDE DU CONCENTRATEUR PARABOLIQUE  
A MOTEUR STIRLING**

**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES**

**FILIERE : GENIE MECANIQUE**

**SPECIALITE : ENERGETIQUE**

**PRESENTE PAR : KAHOUK KHALED**

**DIRECTEUR DU MEMOIRE : MR. KADRI**

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT : PR. MZAD**

**EXAMINATEURS : DR. AZOUZ**

**DR. DJEMILI**

**DR. MECHIGHEL**

**Année: 2015/2016**

## 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.

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

Mon encadreur monsieur **Kadri Salim**, Maître de Conférences au département de génie mécanique à l'Université Badji Mokhtar Annaba, qui a accepté de diriger mon travail, a toujours répondu présent pour tout problème rencontré, pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Que monsieur **Mzad Hocine** professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, trouve dans ce modeste travail, l'expression de mon profond respect et soit remercié d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie en particulier monsieur **Azouz Salah Eddine**, monsieur **Djemili Abdelouahab**, monsieur **Mechighel Farid** (docteurs à l'Université Badji Mokhtar Annaba) pour s'être intéresser à mon travail et m'ont honoré de ses présence au jury.

Enfin, je tiens à remercier tous mes proches pour leur soutien, leurs nombreuses relectures et leur patience au cours de ce travail.

## Résumé :

Le développement économique, provoque une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation des sources d'énergies fossiles. Et 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 propres et renouvelables, comme l'énergie solaire.

Dans l'optique de la production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale.

Cette énergie peut être transformée en chaleur à haute température, par concentration de rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires.

*« Une légende de l'antiquité attribue à Archimède, en 213 av.J.C la destruction de flotte Romaine et le sauvetage de Syracuse grâce à des miroirs concentrant la chaleur solaire ».*

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, Parmi ce type de concentrateurs, il y a les concentrateurs solairesparaboliques. Ces systèmes comportent en général une surface réfléchissante sous forme parabolique destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante.

Il existe toutefois une machine bien intéressante, inventée au début du XIXe siècle, qui semble très prometteuse en ce qui concerne la conversion de l'énergie thermique provenant du Soleil : le moteur Stirling. En fait, il a un rendement supérieur aux cellules photovoltaïques, et même aux moteurs à combustion interne.

## **Abstract :**

Economic development causes a significant growth in energy demand. Unfortunately, this demand growth was largely covered by the import of fossil fuels. And In the context of climate change where the limitation of greenhouse gas emissions is essential, and to the threat of depletion of fossil fuels, the challenge presented is to find sources of clean and renewable energy, such as solar.

In order to produce electricity, solar power is a clean and inexhaustible energy source. Currently the solar concentration technologies are those that have the most potential for commercial exploitation. This energy can be converted into heat at high temperature, for concentration of solar radiation. This operation is performed using sensors called solar concentrators.

The concentrating solar systems provide the ability to generate electricity from solar energy among this type of hubs, there are parabolic solar concentrators. These systems generally comprise a reflective surface in parabolic shape for concentrating solar energy on an absorbent surface.

However, there is a very interesting machine invented in the early nineteenth century, which seems very promising as regards the conversion of thermal energy from the sun: the Stirling engine. In fact, it has superior performance to photovoltaic cells, and even to internal combustion engines.

## ملخص:

التطور الاقتصادي يستوجب تزييدا كبيرا في الطلب على الطاقة. للأسف فان هذا التزايد في الطلب يتم تغطية معظمه من خلال مصادر الوقود الأحفوري (بتروول، فحم، غاز) الأيالة الزوال و النفاد، والمسببة للتغير المناخي الحاصل بسبب الاحتباس الحراري. فان التحدي الحالي هو إيجاد مصادر بديلة للطاقة نظيفة و متجددة، كالطاقة الشمسية مثلا.

في مجال توليد الطاقة الكهربائية تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما وذلك من خلال مجموعة من التقنيات من بينها تركيز الإشعاعات الشمسية التي تعد من بين انجح الخيارات في هذا المجال والمجال الاقتصادي.

إن تقنية استغلال الأشعة الشمسية من خلال تركيزها بواسطة مرايا التركيز ليست وليدة الحاضر وإنما عرفت من عصر ما قبل التاريخ. ومن بين أنواع المركبات الشمسية نتطرق من خلال هذه الدراسة إلى احد أنواعها و هو مركز شمسي على شكل قطع مكافئ حيث يركز الأشعة الموجهة إليه على نقطة ضيقة فترتفع الحرارة إلى مستويات معتبرة.

ولإكمال هذا النوع من الأنظمة الشمسية ندمج مع القطع المكافئ نوع من المحركات يسمى محرك ستيرلينغ الذي هو محرك احتراق خارجي ذو مميزات كثيرة منها انه قادر على الاشتغال بأي مصدر حراري. وهذا المحرك يقوم بدور تحويل الطاقة الحرارية إلى ميكانيكية التي تستعمل عادة لتوليد الكهرباء. ومن مميزات هذا التركيز الشمسي المدمج بمحرك ستيرلينغ أن مردود أكبر من مردود أنظمة الخلايا الضوئية وحتى المحركات ذات الاحتراق الداخلي.

## Table des matières :

Remerciements :	1
Résumé :	2
Introduction Générale :	7
Chapitre I : Le Moteur Stirling	11
I.1- Introduction :	12
I.2- L'Histoire de Robert Stirling :	14
I.3- Les principes De Fonctionnement :	15
I.3.A- Les quatre phases élémentaires :	15
I.3.B- Le rôle du déplaceur :	17
I.3.C- Le diagramme Pression-Volume et le rendement du cycle :	19
I.4- Types du Moteur Stirling :	23
I.4.A- Le moteur Stirling type Alpha :	23
I.4.B- Le moteur Stirling type Bêta:	23
I.4.C- Le moteur Stirling type Gamma :	24
I.5- Fluides de travail du moteur Stirling :	25
I.6- Application du Moteur Stirling :	26
I.7- Les Avantages et Les Inconvénients :	27
I.7.A- Les Avantages :	27
I.7.B- Inconvénients :	28
I.8- Conclusion :	28
Chapitre II : Notions Fondamentales sur le Rayonnement Solaire	29
II.1- Introduction :	30
II.2- Rayonnement Solaire :	30
II.3- Aspects géométriques :	31
II.3.A- Mouvements de la Terre :	31
II.3.B- Mouvement apparent du Soleil :	32
II.3.C- Heures et temps :	34
II.3.D- Durée et taux d'ensoleillement :	35
II.4- Aspects énergétiques :	36
II.4.A- Rayonnement solaire au sol :	36
II.4.B- Rayonnement solaire sur un plan quelconque :	40
II.4.C- Variations types du rayonnement :	40

II.4- Potentiel solaire d'Algérie : .....	42
II.5- Conclusion : .....	43
Chapitre III : Concentrateur Solaire .....	45
III.1- Introduction : .....	46
III.2- Le solaire et la thermodynamique - quelque éléments d'histoire :.....	48
III.3- La Concentration Solaire : .....	55
III.3.A- Le principe de concentration : .....	56
III.3.B- Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques : .....	56
III.3.C- Initiatives internationales : .....	57
III.3.D- Les trois familles de centrales solaires à concentration : .....	57
III.4- Les systèmes Paraboles/Stirling : .....	57
III.4.A- Description du système Parabole/Stirling : .....	59
III.4.B- Le concentrateur : .....	60
III.4.C- Facteur d'interception : .....	64
III.4.D- Le récepteur solaire : .....	65
III.4.E- Pertes de récepteur : .....	65
III.4.F- Modèle du moteur Stirling : .....	66
III.4.G- Régénérateur : .....	67
III.4.H- Système de refroidissement : .....	67
III.5- Conclusion: .....	68
Chapitre IV : Calcul et Simulation du Système Parabole-Stirling .....	70
IV.1- Simulation des systèmes de concentration : .....	71
IV.1.A- Simulation du système de concentration : .....	71
IV.1.B- Traçage de rayonnement avec Tonatiuh : .....	75
IV.2- Les calculs : .....	78
IV.2.A- Le concentrateur solaire : .....	78
IV.2.B- Le moteur Stirling : .....	79
IV. 3- Conclusion : .....	83
CONCLUSION GENERALE : .....	84
Bibliographie : .....	85
Nomenclature : .....	90
Liste des figures : .....	92
Liste des Tableaux : .....	94

## **Introduction Générale :**

Depuis plus d'un siècle un important développement économique, le développement industriel, l'augmentation des usines et du parc automobile, et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation des sources d'énergies fossiles. Et 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.

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. 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.

Dans l'optique de la production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité, par exemple au moyen d'un cycle de Rankine.

Les énergies renouvelables possèdent généralement une limitation due à leur caractère intermittent à leur difficulté de stockage. Si la limitation due au stockage est importante pour des énergies comme l'énergie éolienne ou photovoltaïque, elle l'est moins pour la concentration solaire, qui utilise généralement des systèmes de stockage de chaud ou qui peut être hybridée avec d'autres sources énergétiques (gaz naturel, biomasse, etc). [1]

L'année 2015 doit marquer un tournant dans l'action mondiale contre le changement climatique. À l'heure où les dirigeants du monde entier s'efforcent de parvenir à un accord

intégrant l'exigence de mesures urgentes dans de nombreux domaines, récolter les bénéfices de la transition énergétique devrait être la première des priorités. Tandis que le monde se prépare à prendre des décisions volontaristes lors des négociations de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les responsables politiques devraient prendre en compte les multiples avantages que la transformation du système énergétique peut apporter à la société. L'analyse de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) montre qu'il est réaliste et économiquement bénéfique de se diriger vers un système énergétique à bas carbone. Nous disposons en effet des instruments et des mécanismes nécessaires pour introduire des changements et des innovations profondes conduisant à un futur énergétique abordable, sûr et durable. Les tendances récentes mettent toutefois en évidence la nécessité d'accélérer l'innovation en matière de technologies énergétiques, ce qui exigera notamment un soutien politique et une nouvelle organisation des marchés. [2]

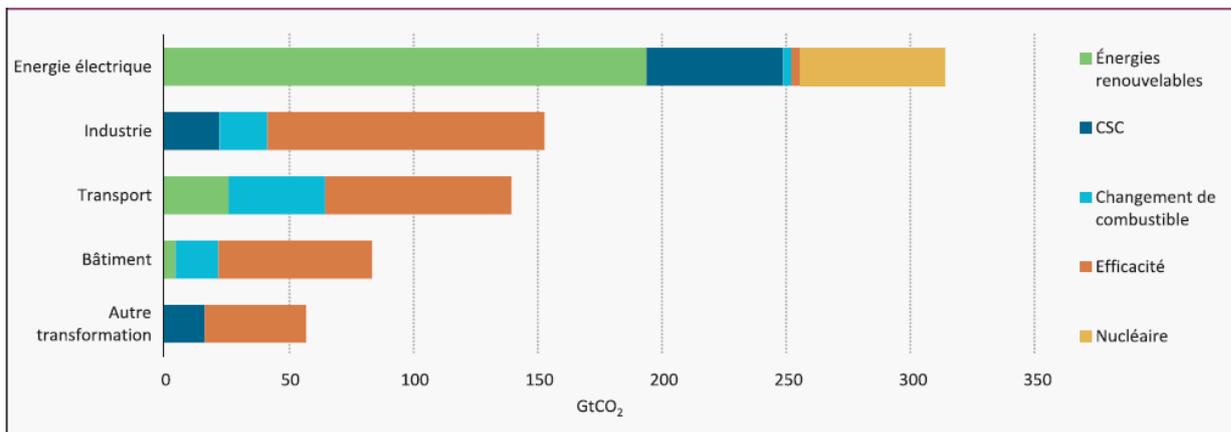


Figure 1 : Réduction cumulée des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur et par technologie dans le scénario 2DS pour 2050. [2]

### ***Problématique environnementale :***

Avec l'augmentation de la population et l'essor des pays émergents, les demandes en énergie ne cessent de croître. Actuellement, environ 37 % de l'énergie consommée provient du pétrole, 25 % du charbon et 23 % du gaz naturel. Cela représente 85 % de l'énergie totale consommée mondialement, alors que 0,5 % provient de l'énergie thermique du Soleil et 0,04 % de l'énergie photovoltaïque. [3] Nous sommes malheureusement très loin de l'exploitation du plein potentiel de l'énergie solaire, qui est propre et renouvelable.

Tout le monde sait que l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole et le charbon est très néfaste pour l'environnement. Toutes les étapes de l'utilisation de ces formes

d'énergie polluent l'eau et l'air, que ce soit durant l'extraction du charbon des mines, l'extraction du pétrole des sables bitumineux, le raffinage ou la combustion dans les moteurs de nos voitures. Les prix ne cessent de grimper et la demande aussi.

En plus d'être chère et polluante, cette énergie provient de ressources naturelles non renouvelables. La pollution de l'eau et de l'atmosphère affecte tous les écosystèmes de la planète. Les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, expulsés dans l'air par la combustion contribuent au réchauffement climatique. Les autres gaz toxiques comme les oxydes d'azote et de soufre entraînent des pluies acides et ont des effets néfastes sur la santé de tous les vivants. Il est donc primordial d'investir dans la recherche et le développement de technologies pour produire de l'énergie à partir de sources d'énergie propres et renouvelables.

Il en existe une grande variété : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique. La maîtrise de ces sources d'énergie est à notre portée et nous devons commencer à les exploiter à grande échelle le plus rapidement possible. En réalité, plusieurs de ces différentes formes d'énergie propre ont une source commune : le Soleil. C'est le Soleil qui réchauffe l'eau et crée le cycle de l'eau que nous exploitons par nos centrales hydroélectriques ou marémotrices. C'est aussi le Soleil qui réchauffe l'atmosphère et engendre le mouvement des masses d'air, autrement dit le vent. Ces sources renouvelables peuvent remplacer peu à peu les sources d'énergie traditionnelles, tout en créant de nouvelles opportunités économiques. Prenons par exemple l'Allemagne où 14,2% de l'énergie provient de sources renouvelables. L'industrie de l'énergie renouvelable a permis de créer près de 240 000 nouveaux emplois. [4]

Cette abondante énergie peut être captée sous deux formes : l'énergie photovoltaïque et l'énergie thermique. L'énergie photovoltaïque est obtenue à l'aide de cellules photovoltaïques dans des panneaux solaires pour convertir la lumière en courant continu. Malheureusement, ces cellules sont très coûteuses. L'énergie thermique du

Soleil, quant à elle, est beaucoup plus facile à capter. Il suffit de laisser un objet foncé au Soleil pour remarquer qu'il se réchauffe. Avec une parabole réfléchissante, on peut concentrer les rayons du Soleil au foyer et donc réchauffer un objet à ce point à de très hautes températures. Et si on y plaçait un engin capable d'exploiter cette chaleur intense?

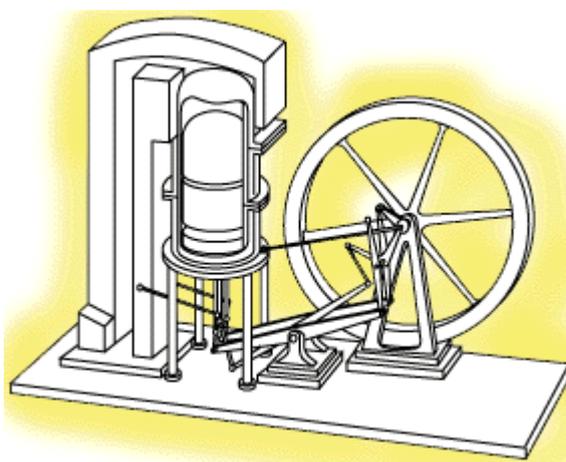
Cela s'avérerait peut-être beaucoup moins coûteux et beaucoup plus efficace que la conversion de lumière en énergie électrique. Nous voulons donc concevoir de façon abordable un système capable de démontrer qu'il est possible de générer de l'énergie à partir du Soleil,

la source d'énergie renouvelable par excellence. C'est dans cette perspective que nous aborderons le moteur Stirling : une machine nécessaire pour le développement durable, utilisant une source d'énergie saine pour l'environnement et renouvelable (énergie photothermique ou l'énergie thermique provenant des déchets industriels) et construite de manière à être le moins dommageable possible pour l'environnement.

# *Chapitre I : Le Moteur Stirling*

## I.1- Introduction :

Pour convertir l'énergie photothermique, ou même simplement thermique, il faut un moteur thermique. Il existe justement un type de moteur thermique nommé « moteur Stirling » qui, de conception simple à la base, permet de convertir directement l'énergie thermique en énergie mécanique de façon plutôt efficace. Le moteur Stirling est né en 1816, d'une brillante idée d'un pasteur écossais, Robert Stirling, qui souhaitait diminuer le nombre d'accidents occasionnés par les machines à vapeur, pourtant en popularité croissante. [5] En effet, les machines à vapeur nécessitent des chaudières où règne une très grande pression, susceptible de causer des accidents mortels. Le moteur Stirling présente donc une innovation pour régler ce problème.



*Figure I.1 : Schéma de la machine de Stirling.*

La chaleur est apportée de l'extérieur de la machine, ce qui réduit les risques d'explosions, car il est inutile de faire chauffer l'eau dans une chaudière à haute pression, puisque chauffer l'air ambiant par combustion suffit pour alimenter ce moteur en énergie. Également, la mise en place d'une pièce appelée « régénérateur » dans la tuyauterie du moteur permet d'éviter une trop grande perte d'énergie, améliorant ainsi son rendement. [6] Toutefois, en raison de problèmes techniques et d'une puissance trop faible par rapport à la machine à vapeur et, plus tard, au moteur à combustion interne, le moteur à air chaud de Stirling n'obtient pas le succès escompté. Le moteur Stirling n'est plus qu'un objet d'étude pour les physiciens.

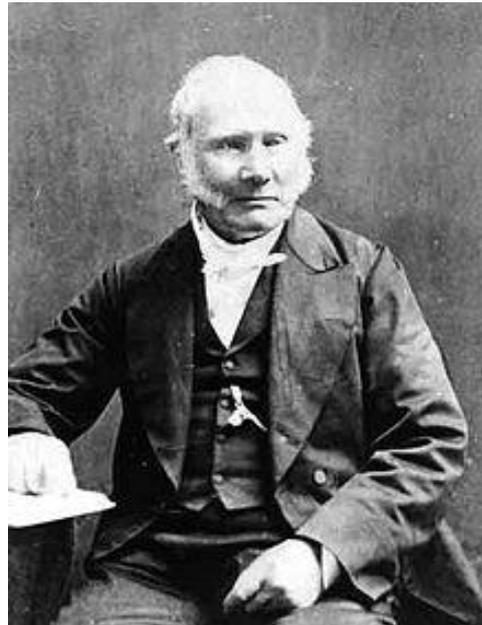
En 1871, les progrès de la thermodynamique accomplis au XIXe siècle permettent à Gustav Schmidt de décrire mathématiquement le cycle de Stirling. À la base, le moteur utilise une différence de température entre deux points pour chauffer, dilater, refroidir et compresser un gaz, et ce, par l'utilisation de réservoirs thermiques, de pistons et de tuyaux permettant les

échanges thermiques appropriés. Comment l'énergie mécanique est-elle produite à partir de l'énergie thermique? Il suffit d'utiliser le principe suivant : compresser un gaz *demande* de l'énergie, faire dilater un gaz *fournit* de l'énergie et plus la pression du gaz est grande, plus ces échanges d'énergie seront importants. [7] C'est la différence de température qui permet de faire varier la pression selon l'étape du cycle.

Premièrement, on dilate le gaz à haute pression : cela fournit beaucoup d'énergie. Deuxièmement, on envoie le gaz du côté froid et la pression diminue. Troisièmement, on comprime le gaz à basse pression : cela demande un peu d'énergie, mais moins que ce qui a été fourni à la première étape. Quatrièmement, on envoie le gaz du côté chaud et la pression remonte. Puis, on recommence. Donc, le principe de base consiste à faire dilater un gaz à haute pression, ce qui fournit beaucoup d'énergie, puis de le comprimer à basse pression, ce qui demande de l'énergie, mais moins. Donc, à chaque fois que le cycle est répété, on récolte un surplus d'énergie. Bien sûr, il faut constamment alimenter le moteur en énergie thermique pour maintenir la différence de température et faire tourner le moteur. On appelle cela le cycle de Stirling (bien que ce ne soit pas Stirling qui l'ait décrit, car ce moteur fait partie des nombreuses innovations technologiques inventées avant que la science soit assez avancée pour décrire le phénomène à la base de leur fonctionnement). [5]

Effectivement, ce n'est pas parce que Robert Stirling utilisait la combustion pour alimenter son moteur en énergie thermique qu'il n'est pas possible d'utiliser d'autres sources d'énergie : énergie solaire, énergie géothermique, énergie nucléaire, chaleur rejetée par les usines, etc. Dans une perspective écologique, c'est extrêmement intéressant, d'autant plus que le régénérateur, du fait qu'il préchauffe et prérefroidit le gaz, permet littéralement de recycler de l'énergie! Ainsi, les avancées en sciences des matériaux permettent maintenant d'utiliser des matériaux qui supportent des écarts de température très importants et des composites qui améliorent le transfert de chaleur au sein du régénérateur. [8] La situation est telle que les moteurs Stirling sont couplés avec des paraboles solaires géantes et utilisent l'énergie solaire avec un rendement supérieur aux cellules photovoltaïques, à un prix élevé toutefois.

## I.2- L'Histoire de Robert Stirling :



*Figure I.2 : Robert Stirling (25 octobre 1790 - 6 juin 1878).*

Le Pasteur Robert Stirling est né le 25 octobre 1790, à Glog in dans le comté de Perthshire en Ecosse. Il est mort le 6 juin 1878 à Galston, ville située à 30 km environ au sud de Glasgow. Il était le troisième enfant d'une famille en comprenant huit. Son grand-père paternel fabriquait des batteuses, son grand-père maternel était agriculteur. Il poursuivit de brillantes études à l'université d'Edimbourg de 1805 à 1808. Ensuite, il se tourna vers des études de théologie à l'université de Glasgow pour devenir pasteur. Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jean Rankin. Ils eurent sept enfants.

La vie de Robert Stirling se déroule durant le dix-neuvième siècle qui voit de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est probablement ce bouillonnement d'idées, sa curiosité naturelle et son pragmatisme qui pousseront Robert Stirling à inventer "le moteur à air chaud". Le brevet fut déposé le 27 septembre 1816 et fut effectif le 20 janvier 1817.

A cette époque, il arrivait fréquemment que des chaudières à vapeur explosent et fassent des victimes. Les problèmes de conception, la qualité encore médiocre des matériaux, une quasi-absence de règles d'utilisation et de maintenance sont à l'origine de ces sinistres. Ceci a probablement motivé Robert Stirling à imaginer un moteur sans chaudière soumise à de trop fortes pressions. Le principe de fonctionnement est relativement simple : la combustion est externe, le fluide principal est de l'air à une modeste pression.

Robert Stirling eut également l'idée d'un régénérateur de chaleur permettant d'améliorer le rendement global de l'installation. En bon écossais, il appelait cet appareil un "économiseur". Son frère James "industrialisa" ce moteur en 1843 pour une utilisation dans l'usine où il était ingénieur.

Cette invention eut d'autres applications dans le monde agricole et dans l'industrie jusqu'en 1922 pour pomper de l'eau ou entraîner des générateurs de courant électrique. Cependant, elle ne connut pas tout l'essor que Robert Stirling et son frère James auraient pu souhaiter, probablement pour des raisons de compétitivité. La machine à vapeur, pourtant plus dangereuse à cette époque, prit les devants. Puis, à la fin du dix-neuvième siècle, le moteur à combustion interne commença à s'imposer. Ensuite, on vit les premières applications industrielles de la motorisation électrique.

Il a fallu attendre 1938 pour que la société Philips investisse dans le moteur à air chaud, désormais appelé "moteur Stirling". Des applications furent développées dans le domaine automobile. Un moteur compact de plus de 200 chevaux, avec un rendement supérieur à 30% vit le jour. Malheureusement, pour des raisons de compétitivité, cette application ne rencontra pas le succès escompté.

Robert Stirling et son moteur n'ont pas la renommée qu'ils méritent. Il est probable que le vingt-et-unième siècle, avec ses soucis en matière d'énergie et d'écologie, verra la réparation de cette injustice. Robert Stirling à longtemps attendu son heure, celle-ci arrivera, sans aucun doute, plus de deux siècles après sa naissance. [5]

### **I.3- Les principes De Fonctionnement :**

Dans sa description la plus simple, le moteur Stirling est constitué d'un cylindre renfermant du gaz et d'un piston récupérant l'énergie mécanique. Première observation : le gaz utilisé est enfermé, c'est toujours le même qui est mis à contribution. Autre caractéristique : l'énergie est fournie à l'extérieur du cylindre, d'où les appellations "moteur à air chaud" ou "moteur à combustion externe" que l'on peut lire parfois.

#### **I.3.A- Les quatre phases élémentaires :**

Le cycle thermodynamique du moteur Stirling est dans son principe très simple : il comprend 4 phases pendant lesquelles le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

➤ **Un chauffage isochore (à volume constant) :**

Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. On s'imagine aisément que la pression et la température du gaz augmentent durant cette phase.

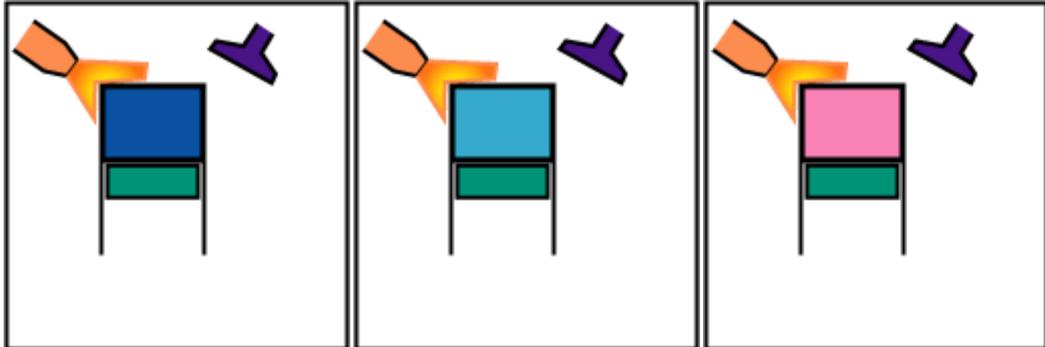


Figure I.3 : Schéma de la 1<sup>er</sup> phase (chauffage isochore).

➤ **Une détente isotherme (à température constante):**

Le volume s'accroît alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.



Figure I.4 : Schéma de la 2<sup>em</sup> phase (détente isotherme).

➤ **Un refroidissement isochore :**

L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique. La température et la pression diminuent pendant cette phase.

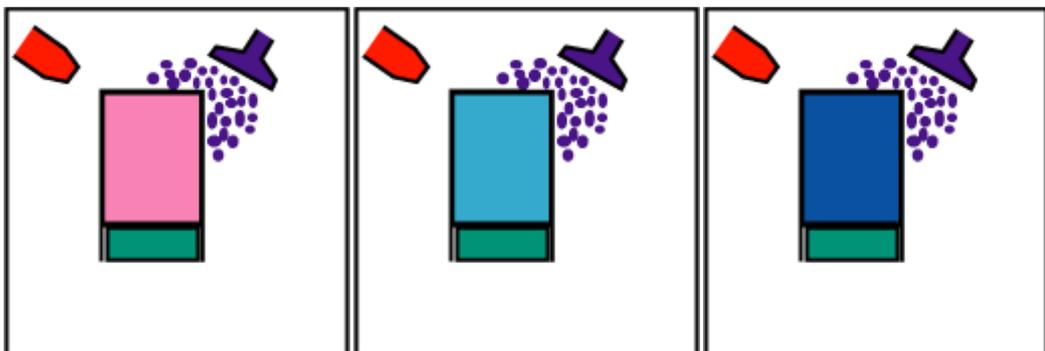


Figure I.5 : Schéma de la 3<sup>em</sup> phase (refroidissement isochore).

➤ **Une compression isotherme :**

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.

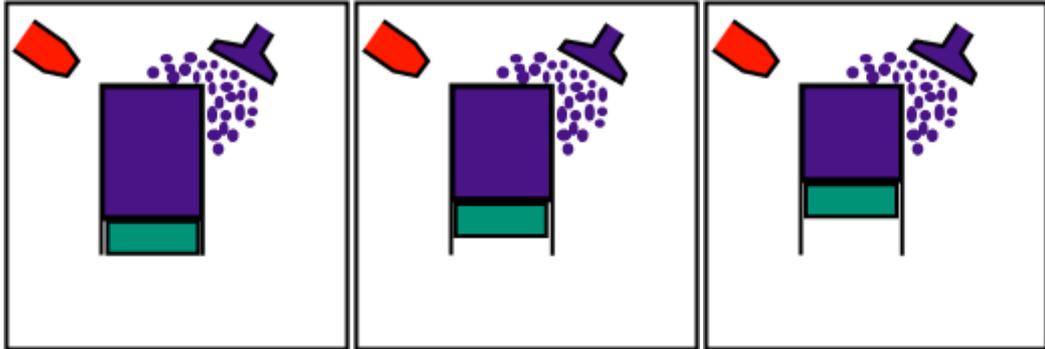


Figure I.6 : Schéma de la 4<sup>em</sup> phase (compression isothermique).

**I.3.B- Le rôle du déplaceur :**

La réalisation d'un moteur tel que celui décrit ci-dessus poserait des difficultés : allumer le brûleur, l'éteindre, asperger puis arrêter le refroidissement, chocs thermiques successifs.

C'est pourquoi on va introduire un artifice apportant des solutions à ces problèmes: le déplaceur. Ce dernier ne modifie ni la pression ni le volume du gaz, mais l'oblige se situer soit vers la source chaude située en partie supérieure, soit vers la source froide située en partie inférieure.

➤ **Chauffage isochore :**

Le volume reste constant, mais le déplaceur, en descendant, chasse le gaz de la partie basse (froide) vers la partie haute (chaude).

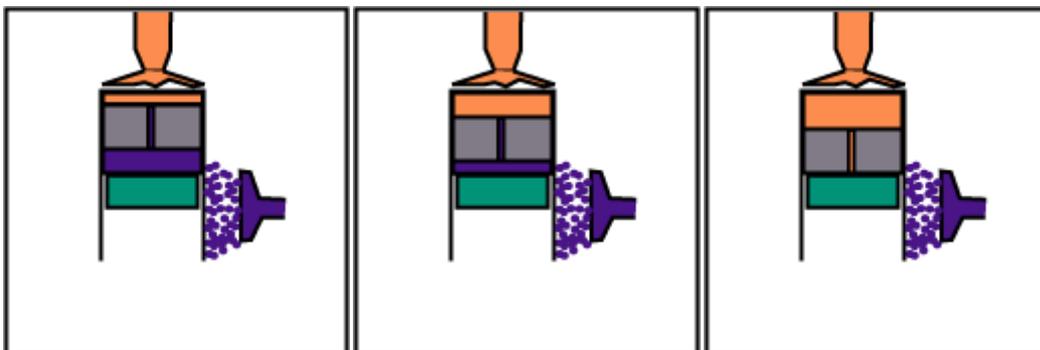


Figure I.7 : Schéma de déplaceur en Chauffage isochore.

➤ **Détente isotherme :**

Le déplaceur suit le piston moteur au cours de la détente pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source chaude.

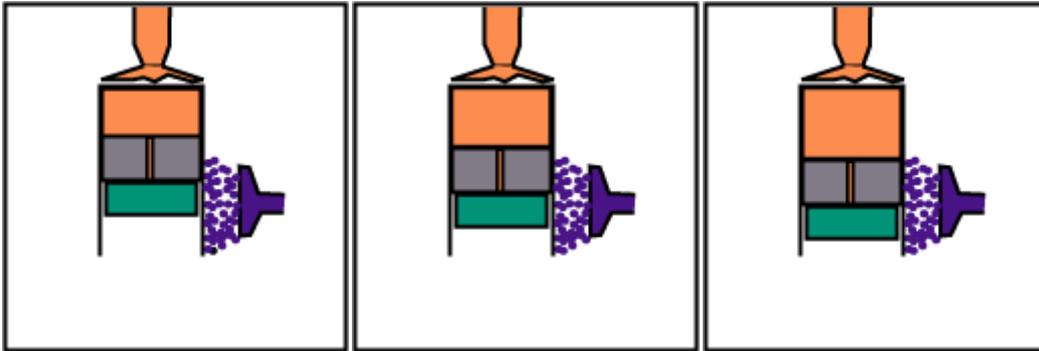


Figure I.8 : Schéma de déplaceur en Détente isotherme.

➤ **Refroidissement isochore :**

Le volume reste constant, mais le déplaceur, en montant, fait passer le gaz de la partie haute (chaude) à la partie basse (froide).

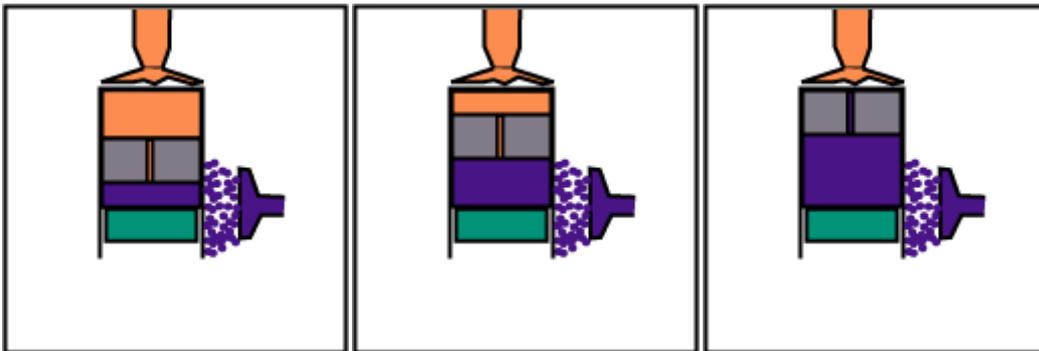


Figure I.9 : Schéma de déplaceur en Refroidissement isochore.

➤ **Compression isotherme :**

Le déplaceur, au cours de la compression, reste en partie supérieur pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source froide.

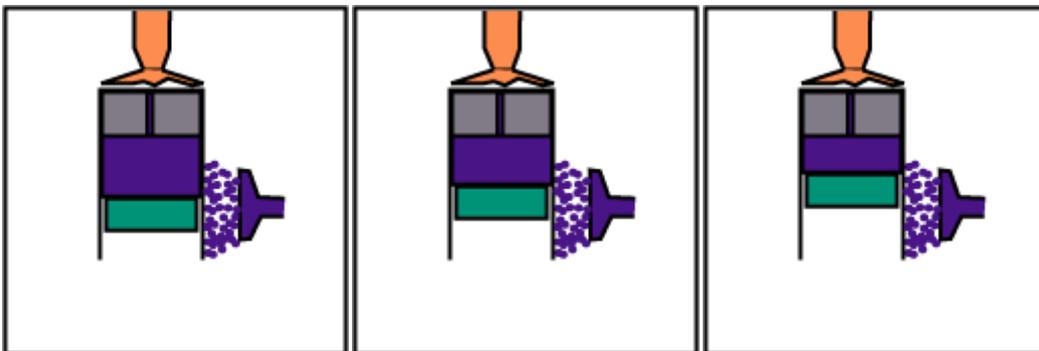


Figure I.10 : Schéma de déplaceur en Compression isotherme.

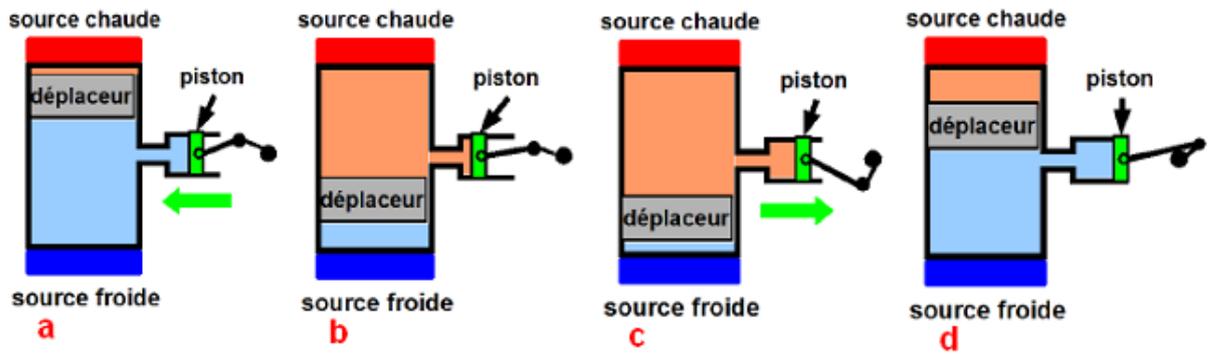


Figure I.11 : principe de fonctionnement d'un moteur Stirling. [9]

### I.3.C- Le diagramme Pression-Volume et le rendement du cycle :

#### ➤ Le diagramme (P, V) :

Le principe de fonctionnement, exposé ci-dessus, peut se représenter sur un schéma appelé "diagramme Pression-Volume" ou diagramme (P, V).

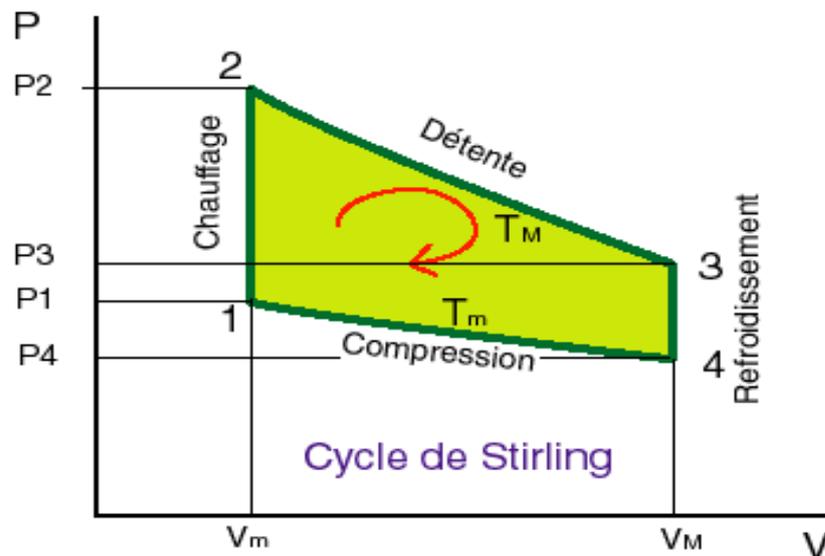


Figure I.12 : Diagramme P, V du moteur Stirling. [9]

Sur ce diagramme, on voit aisément les quatre phases détaillées plus haut en images, en n'oubliant pas que détente et compression se font à températures constantes ( $T_{max}$  et  $T_{min}$ ). NB : les températures T sont exprimées en Kelvin (rajouter  $273^\circ$  à la température Celsius). L'aire colorée comprise entre les quatre segments décrivant le cycle est représentative du travail recueilli au cours d'un cycle.

#### ➤ Le rendement du cycle :

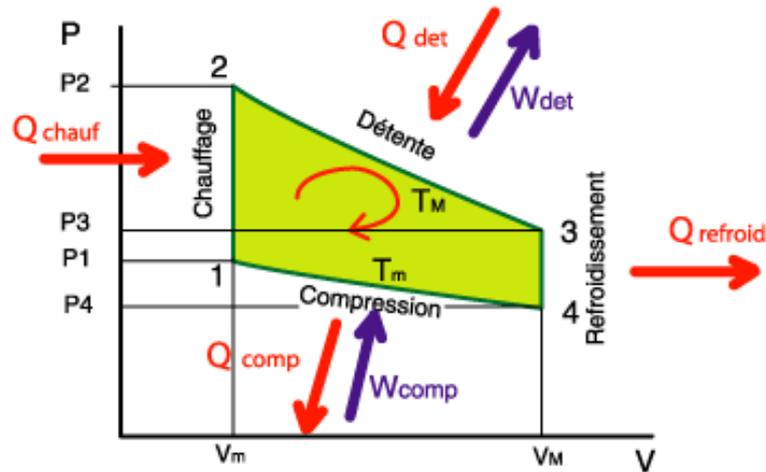


Figure I.13 : Diagramme P, V du moteur Stirling.

Le rendement est le rapport entre l'énergie totale fournie au moteur et l'énergie totale récupérée en sortie. Ici, l'énergie récupérée est un travail mécanique, noté  $W_m$ . L'énergie fournie au moteur est la quantité de chaleur apportée par la source chaude externe. Calculons les travaux et quantités de chaleur échangés pour chaque transformation (en thermodynamique, par convention, une énergie reçue par le système est positive, tandis qu'une énergie cédée par le système est négative). Les notations suivantes seront utilisées: [13]

$W_{1-2}$  : Travail échangé lors de la transformation 1-2, exprimé en Joules (J)

$Q_{1-2}$  : Quantité de chaleur échangée lors de la transformation 1-2, en Joules (J)

U : énergie interne d'un système en Joules (J)

P : pression en Pascals (Pa)

$V_1$  : Volume au point 1 en  $m^3$

$T_1$  : Température au point 1 en Kelvin (K)

R : constante des gaz parfaits,  $J.mol^{-1}.K^{-1}$

n : quantité de matière en moles (mol)

$C_v$  : Capacité thermique molaire à volume constant, en  $J.mol^{-1}.K^{-1}$

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à un système fermé s'écrit :

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q. \quad (I.1)$$

Pour un système immobile et où les différences d'altitude sont négligées. On écrit :

$$\Delta U = W + Q. \quad (I.2)$$

On note que :  $V_1 = V_2 = V_m$  et  $V_3 = V_4 = V_M$ .

De plus :  $T_2 = T_3 = T_M$  et  $T_1 = T_4 = T_m$

- **1-2 : La transformation est isochore :**

$$W_{1-2} = \int_1^2 -P \cdot dV = 0 \quad (\text{I.3})$$

$$Q_{1-2} = n \cdot C_v \cdot \Delta T = n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1) = n \cdot C_v \cdot (T_M - T_m) \quad (\text{I.4})$$

- **2-3 : c'est une transformation isotherme.**

$$\begin{aligned} W_{2-3} &= \int_{V_2}^{V_3} -P \cdot dV = -n \cdot R \cdot T_M \cdot \int_{V_2}^{V_3} \frac{1}{V} \cdot dV \\ &= -n \cdot R \cdot T_M \cdot [\ln V]_{V_2}^{V_3} = -n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \end{aligned} \quad (\text{I.5})$$

$$Q_{2-3} = -W_{2-3} = n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \quad (\text{I.6})$$

- **3-4 : La transformation est isochore :**

$$W_{3-4} = \int_3^4 -P \cdot dV = 0 \quad (\text{I.7})$$

$$Q_{3-4} = n \cdot C_v \cdot \Delta T = n \cdot C_v \cdot (T_4 - T_3) = n \cdot C_v \cdot (T_m - T_M) \quad (\text{I.8})$$

- **4-1 : Transformation isotherme :**

$$\begin{aligned} W_{4-1} &= \int_{V_4}^{V_1} -P \cdot dV = -n \cdot R \cdot T_m \cdot \int_{V_4}^{V_1} \frac{1}{V} \cdot dV \\ &= -n \cdot R \cdot T_m \cdot [\ln V]_{V_4}^{V_1} = n \cdot R \cdot T_m \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \end{aligned} \quad (\text{I.9})$$

$$Q_{4-1} = -W_{4-1} = -n \cdot R \cdot T_m \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \quad (\text{I.10})$$

- **Somme des travaux et des quantités de chaleur sur le cycle :**

$$\begin{aligned} W_{tot} &= \sum_{cycle} W_i = W_{2-3} + W_{4-1} = n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) - n \cdot R \cdot T_m \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \\ &= n \cdot R \cdot (T_M - T_m) \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \end{aligned} \quad (\text{I.11})$$

Ce produit est négatif, ce qui correspond au résultat attendu, un travail fourni par le système.

La quantité totale de chaleur fournie au cycle est donnée pendant les étapes 1 à 2 et 2 à 3.

$$Q_{tot} = \sum_{cycle} Q_i = Q_{1-2} + Q_{2-3} = n \cdot C_v \cdot (T_M - T_m) + n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \quad (\text{I.12})$$

- **Le rendement global du cycle est donné par la formule :**

$$\eta = \frac{|W_{tot}|}{Q_{tot}} = \frac{|n \cdot R \cdot (T_m - T_M) \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)|}{n \cdot C_v \cdot (T_M - T_m) + n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)} = \frac{|R \cdot (T_m - T_M) \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)|}{C_v \cdot (T_M - T_m) + R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)} \quad (\text{I.13})$$

Le gros inconvénient du cycle tel que nous l'avons décrit est la perte de la chaleur reçue par le fluide lors de la transformation isochore 1–2. Pour palier à ce problème, Robert Stirling a alors créé le régénérateur.

- **Amélioration du cycle : le régénérateur et le radiateur :**

Le régénérateur du moteur de Stirling est un échangeur de chaleur. Il permet de récupérer la chaleur cédée par le fluide lors de la transformation isochore 3–4, et de l'utiliser pour chauffer le fluide de travail lors de la transformation 1–2. On voit alors que si on parvient à récupérer toute la chaleur  $Q_{3-4}$  et à la restituer de manière totale (cas idéal), alors on diminue de manière sensible la quantité de chaleur à apporter au fluide, puisque la source chaude n'aura plus que la chaleur  $Q_{2-3}$  à apporter au système. [13]

Intéressons nous à présent au rendement du cycle de Stirling incluant un régénérateur considéré comme idéal (on considère que toute la chaleur cédée est restituée, ce qui bien entendu n'est pas rigoureusement possible). Nous pouvons récupérer l'expression de  $W_{tot}$  précédente, cependant il convient de modifier celle de  $Q_{tot}$ . En considérant les hypothèses ci-dessus, on peut donc écrire :

$$Q_{tot}' = Q_{2-3} = n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right) \quad (I.14)$$

$$\eta = \frac{|W_{tot}|}{Q_{tot}'} = \frac{|n \cdot R \cdot (T_m - T_M) \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)|}{n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)} = \frac{|T_m - T_M|}{T_M} = \frac{T_M - T_m}{T_M} = 1 - \frac{T_m}{T_M} \quad (I.15)$$

Le rendement que nous obtenons ici est égal au rendement de Carnot, ce qui correspond au rendement idéal pour une machine thermique ayant des températures de sources chaude et froide respectivement  $T_M$  et  $T_m$ . L'intérêt du régénérateur est donc ici mis en évidence.

Prenons un exemple numérique pour illustrer ces différences. Un moteur Stirling dont la source chaude est à la température de 320°C (593K), sa source froide à température ambiante, soit 20°C (293K), et qui fonctionne à l'air ( $C_v = 20,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Le taux de compression sera considéré égal à 10 ( $V_M = 10V_m$ ). On obtient après calcul :  $\eta = 0,33$  soit 33% et  $\eta' = 0,51$  soit 51%.

Cet exemple montre la nette différence entre les deux rendements, à données égales, entre un moteur disposant d'un régénérateur et un n'ayant pas ce système. Il est à noter que pour améliorer encore les performances du système, la grande majorité des moteurs Stirling n'utilisent plus l'air extérieur comme source froide. En effet, la plupart utilisent un

refroidissement liquide, dont le fluide est déplacé par une pompe. Sur ce circuit est également présent un radiateur à ailettes permettant au liquide de céder la chaleur à l'extérieur. Un ventilateur est également présent pour augmenter la convection de l'air sur l'échangeur.

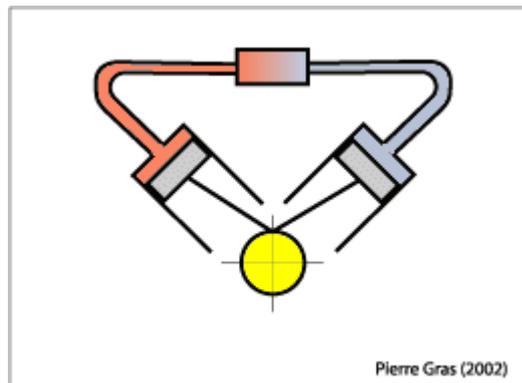
Cette installation permet non seulement une plus grande régularité de température de la source froide, mais également un bien meilleur échange thermique grâce à l'utilisation d'un liquide caloporteur en lieu et place de l'air. En revanche, la maintenance est augmentée de part la complexification de l'appareil.

## **I.4- Types du Moteur Stirling :**

Il existe une très grande diversité de moteurs Stirling. On les classe généralement en fonction de leur configuration géométrique. Selon ce critère, il y a trois types principaux de : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma.

### **I.4.A- Le moteur Stirling type Alpha :**

Le moteur bicylindre ou alpha est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la source froide et un autre est associé à la source chaude. Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume selon les phases.



*Figure I.14 : Schéma d'un moteur stirling type Alpha. [10]*

### **I.4.B- Le moteur Stirling type Bêta:**

Le moteur bêta est un moteur monocylindre constitué de deux pistons. Un piston de travail (gris foncé) utile pour la compression et la détente. Un piston 'déplaceur' (gris clair) pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude.

Un Stirling bêta utilise également un volume de gaz délimité entre ses deux pistons. Qui combinent :

- Un mouvement relatif lors du changement de volume du gaz,
- Un mouvement commun qui déplace ce volume de la partie chaude vers la partie froide, et vice-versa.

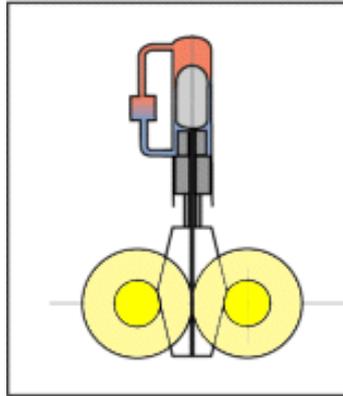


Figure I.15 : Schéma d'un moteur stirling type Bêta. [11]

#### I.4.C- Le moteur Stirling type Gamma :

Le moteur gamma est un peu le compromis entre le moteur type alpha et le moteur type bêta. Dans un cylindre le déplaceur joue son rôle, dans l'autre le piston moteur fait varier le volume global et récupère l'énergie. Ce type de moteur est fréquemment utilisé pour mettre à profit de faibles écarts de température entre source froide et source chaude (moteur LTD pour moteur "Low Temperature Difference").

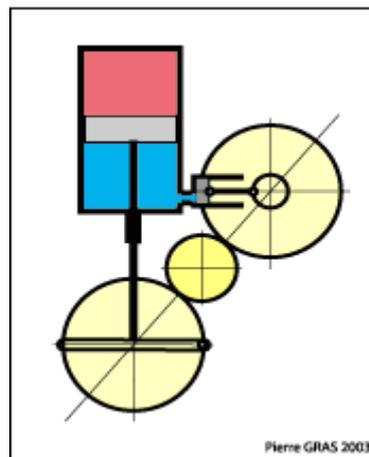


Figure I.16 : Schéma d'un moteur stirling type gamma. [12]

## I.5- Fluides de travail du moteur Stirling :

Nous considèrerons ici que tous les gaz étudiés sont supposés parfaits dans les conditions de fonctionnement du moteur de Stirling. Le moteur originel de Robert Stirling et beaucoup de ses successeurs fonctionnaient à l'air chaud. En revanche, les installations modernes utilisent d'autres fluides de travail permettant une meilleure efficacité. Le critère principal utilisé pour le choix du gaz est la capacité de celui-ci à échanger de la chaleur. En effet, plus elle sera élevée, plus les phases de chauffages et de refroidissement seront efficaces, et donc plus la température du fluide sera proche de celles de la source chaude et froide lors de son passage dans ces endroits.

La grandeur permettant ce choix est la capacité thermique massique du fluide considéré. Elle est définie comme la quantité d'énergie à apporter à une unité de masse de ce fluide pour élever sa température d'un degré. Généralement, elle est exprimée en Joules par kilogramme et par Kelvin ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ).

**NB :** C'est également la définition originelle de la calorie : quantité d'énergie à apporter à un gramme d'eau pour élever sa température d'1°C de 14,5°C à 15,5°C, ce qui correspond à une énergie de 4,185 Joules. [13]

Pour avoir des valeurs numériques à des fins de comparaison, on parle de capacité thermique massique à pression constante. Les valeurs usuelles données à pression normale ( $1,013.10^5$  Pa) sont les suivantes :

- Air:  $C_p = 1004 J.kg^{-1}.K^{-1}$
- Helium:  $C_p = 3160 J.kg^{-1}.K^{-1}$
- Dihydrogène:  $C_p = 10140 J.kg^{-1}.K^{-1}$

Comme nous pouvons le voir d'après ces données, le dihydrogène présente la capacité thermique la plus importante. Il permet donc de maximiser l'échange de chaleur entre les sources de chaleur et le fluide.

D'autres critères entrent en jeu dans le choix du fluide de travail, tels que la viscosité et la densité. Ces deux paramètres influent principalement sur les pertes de charge se produisant dans le circuit, notamment au niveau de l'absorbeur.

Le moteur Solo V161 et le kockums 4-95 fonctionnent tous deux avec du dihydrogène, et le Solo V161 peut également utiliser de l'hélium, avec cependant un rendement moins important (d'environ 5%). [13]

## **I.6- Application du Moteur Stirling :**

Les atouts du moteur Stirling lui donnent un avantage dans certains domaines sur ses concurrents et il pourrait y connaître un bel essor. Parmi ces domaines d'applications les plus crédibles, il convient de citer :

- la propulsion des navires et des sous-marins. Plusieurs sous-marins actuellement en service, tant civils que militaires, sont propulsés par de moteurs Stirling cinématique. Outre qu'il est silencieux, le moteur Stirling possède en effet un autre avantage déterminant sur le moteur à combustion interne pour ce type d'application : la chaleur peut être fournie par combustion continue de fuel et d'oxygène sous pression. La chambre de combustion étant pressurisée, les gaz de combustion peuvent être directement rejetés dans l'eau de mer sans devoir être comprimés au préalable, ce qui accroît considérablement l'autonomie en plongée.
- la production d'électricité à partir de biomasse en zone rurale. Il y a actuellement un créneau important pour la conversion énergétique de combustible peu noble dans un domaine de puissance de l'ordre de 0,5 kWe-1MWe à partir de charbon, de combustible industriel, de déchets commerciaux et agricoles ainsi que de la biomasse (bois ou carburant d'origine végétale).
- la production d'électricité à basse puissance à partir de combustible fossile pour besoins locaux : campings, bâtiments isolés, marchés, travaux publics, bateaux de plaisance... Les concurrents immédiats du moteur Stirling pour de telles applications sont les moteurs à combustion interne, les éoliennes ou encore le photovoltaïque. Ils ont tous des désavantages comme le bruit, les mauvaises conditions météorologiques ou l'encombrement.
- la production d'électricité pour véhicules hybrides, le moteur Stirling étant une alternative intéressante à la turbine à gaz ou au moteur à combustion interne pour cette application.
- la production d'électricité à partir d'énergie solaire pour application stationnaire; cette application a été particulièrement développée aux Etats-Unis et a bénéficié d'un support important de la NASA. De telles installations peuvent être munies de brûleurs de

combustible fossile d'appoint permettant de garantir la production d'électricité quelles que soient les conditions climatiques ainsi que la nuit.

- la production d'électricité à partir d'énergie solaire pour application spatiale, très étudiée aux Etats-Unis et au Japon. Les satellites artificiels sont de plus en plus gourmands en électricité. Or, la conversion de l'énergie solaire en électricité par cellules photovoltaïques s'effectue avec un mauvais rendement, conduisant à de grandes surfaces de captation. Ces panneaux solaires posent un double problème : il est délicat d'assurer un pointage précis vers le soleil de ces grandes surfaces. En outre, ces surfaces augmentent la traînée du satellite dans l'atmosphère résiduelle, et donc diminuent sa durée de vie. Il est donc important de trouver des systèmes de conversion d'énergie plus performants. Le moteur Stirling est un candidat potentiel, grâce à ses bonnes performances énergétiques et parce qu'il peut être parfaitement équilibré. A cet égard, il possède un avantage sur les cycles de Rankine à vapeur organique, également étudiés pour ce type d'application, car l'effet gyroscopique provoqué par la rotation de la turbomachine pose problème.
- la cogénération dans le secteur tertiaire et résidentiel ; les qualités intrinsèques de propreté, de fiabilité, d'absence de besoin de maintenance mais surtout de silence autorisent l'utilisation du moteur Stirling comme élément de cogénération à l'échelle de l'habitat individuel, ce qui n'est pas possible avec les moteurs à combustion interne. [14]  
[15]

## **I.7- Les Avantages et Les Inconvénients :**

### **I.7.A- Les Avantages :**

Le moteur Stirling possède de nombreux avantages par rapport aux moteurs à explosion :

- Contrairement aux moteurs à explosion, le moteur Stirling ne présente pas de combustion interne, ce qui lui permet d'être moins bruyant, moins polluant et vibre moins qu'un moteur classique.
- Ce moteur est aussi réversible, il peut devenir pompe à chaleur s'il est couplé à un autre moteur.
- On peut aussi citer son aptitude écologique qui répond aux exigences environnementales en matière de pollution.
- Enfin le moteur Stirling fonctionne avec plusieurs sources de chaleurs : gaz, charbon, fuel, bois, déchets, géothermie et énergie solaire.

### **I.7.B- Inconvénients :**

Malgré des avantages importants, le moteur Stirling a cependant quelques inconvénients :

- Ce moteur a des problèmes d'étanchéité difficiles à résoudre lorsque la pression est élevée.
- Moteurs Stirling ont souvent une réponse plus lente à une augmentation ou une diminution de la charge.
- Joints d'hydrogène ou de l'hélium peuvent être problématiques pour les moteurs Stirling cinématiques.
- le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés.

### **I.8- Conclusion :**

Le moteur Stirling permet de convertir directement l'énergie thermique en énergie mécanique de façon plutôt efficace. Dans sa description la plus simple, le moteur Stirling est constitué d'un cylindre renfermant du gaz et d'un piston récupérant l'énergie mécanique. C'est la différence de température qui permet de faire varier la pression. L'énergie est fournie à l'extérieur du cylindre, d'où les appellations "moteur à air chaud" ou "moteur à combustion externe" que l'on peut lire parfois.

Selon leur configuration géométrique, il existe trois types principaux de moteurs Stirling : le moteur alpha, bêta et gamma.

Les atouts du moteur Stirling lui donnent un avantage dans certains domaines d'application (Production de l'électricité par exemple).

Le moteur Stirling connaît depuis quelques années, un important regain d'intérêt, essentiellement lié à son rendement théorique élevé, à son caractère peu polluant et à sa grande adaptabilité à tout type de source de chaleur. Mais il faut noter que tous les modèles réalisés jusqu'ici ont des faibles performances. Et ceci est dû essentiellement aux pertes thermiques et mécaniques, surtout celles qui existent au niveau du régénérateur (pertes par conduction), ainsi que les pertes de charges dans le réchauffeur, le refroidisseur et le régénérateur.

*Chapitre II : Notions  
Fondamentales sur le  
Rayonnement Solaire*

## **II.1- Introduction :**

La connaissance du rayonnement solaire est essentielle au calcul de diverses performances des systèmes liés au solaire, tels que les chauffe-eau solaires, les modules photovoltaïques, mais également pour la construction des bâtiments dans la perspective d'une meilleure isolation thermique adaptée au lieu géographique et aussi pour le chauffage de habitations et des locaux par de l'énergie solaire. Les exemples d'utilisation ne font que s'accroître au fil du temps. Cependant le développement de ces filières ne pourra se faire sans la connaissance approfondie du rayonnement solaire.

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est réduit, par diffusion moléculaire, par diffusion par les aérosols et par absorption par les molécules de gaz. Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri ont estimé à environ 10 % à midi en été l'atténuation due à la diffusion moléculaire. L'atténuation due aux aérosols est beaucoup plus variable, typiquement entre 5 et 60 %, selon la hauteur du Soleil et la transparence de l'atmosphère. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance respective des rayonnements diffus et direct, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant additionnel. On appelle albédo, le rapport entre énergie réfléchie et énergie incidente. [16]

L'énergie solaire offre énormément d'opportunités intéressantes en ce qui concerne l'énergie renouvelable. Ce que la majorité de la population a de la difficulté à cerner, c'est le potentiel incroyable du solaire. En fait, en provenance du Soleil, on reçoit chaque année une énergie de 3,85 yottajoules sur la surface de la Terre ( $3,85 \cdot 10^{24}$  Joules, c'est-à-dire plus de 800 milliards de tonnes de TNT, en comparaison!). Cette quantité d'énergie annuelle est si importante qu'elle représente le double de l'énergie pouvant être générée avec toutes les ressources non renouvelables qui existent sur la Terre, comme les combustibles fossiles. [24]

## **II.2- Rayonnement Solaire :**

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{27}$  Tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermo-nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde  $5,64 \cdot 10^8$  Tonnes d'hydrogène en  $5,60 \cdot 10^8$  Tonnes d'Hélium. La Terre étant à une distance de  $1,50 \cdot 10^8$  Km du Soleil.

La valeur du flux de rayonnement solaire (I) reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $I_0$  est appelée la *constante solaire*, elle vaut  $I_0 = 1367 \text{ w/m}^2$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de I en fonction du numéro du jour de l'année N par :

$$I = I_0 \left[ 1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot N}{365} \right] \quad (\text{II} - 1)$$

On notera que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à 4  $\mu\text{m}$ . En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K. [17]

### **II.3- Aspects géométriques :**

Nous allons nous intéresser ici aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire.

#### **II.3.A- Mouvements de la Terre :**

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'*écliptique*.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $1,49 \cdot 10^8 \text{ Km}$ .

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'*équateur*. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *inclinaison* et qui vaut  $23^\circ 27'$ . Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la (figure II.1).

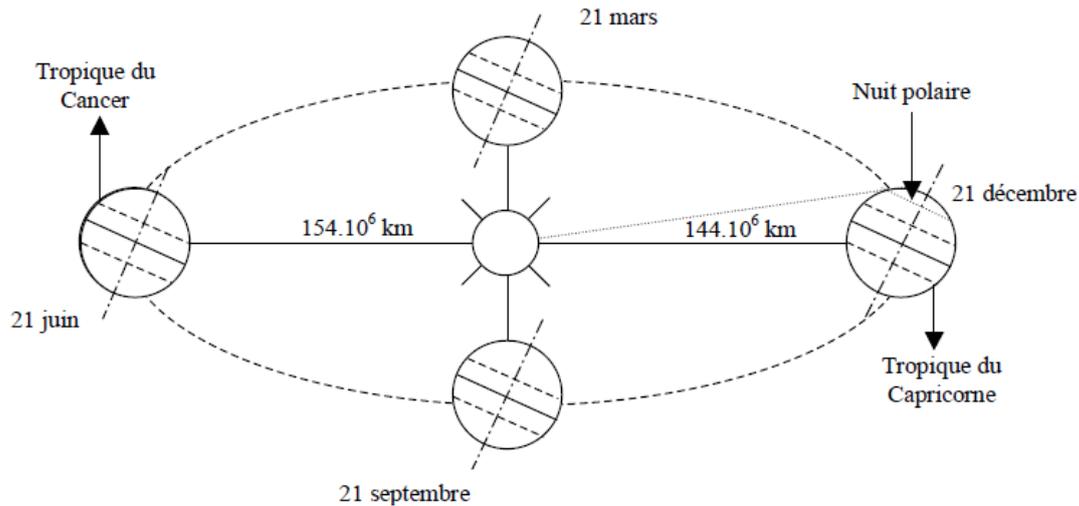


Figure II.1 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

On appelle *déclinaison* ( $\delta$ ) l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation : [17]

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[ \frac{284 + N}{365} \cdot 360 \right] \quad (\text{II.2})$$

Où  $N$  est le numéro du jour de l'année.

Cette formule donne la déclinaison *en degrés*, l'erreur sur  $\delta$  est comprise dans l'intervalle  $[-1,4^\circ; +0,5^\circ]$ .

### II.3.B- Mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude  $L$  au nord de l'équateur est représenté sur la figure II.2.

Un point à la surface de la terre est localisé par deux coordonnées angulaires : la latitude  $l$  et la longitude  $L$ .

- *Longitude (L) :*

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  $15^\circ$  donnant naissance aux 24 fuseaux horaires. [18]

- *Latitude (l) :*

La latitude  $l$  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. [18]

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

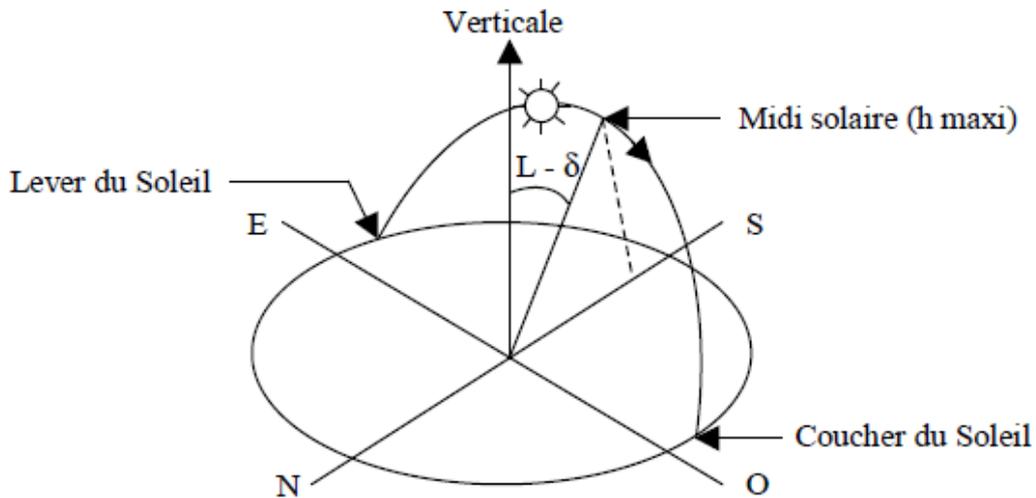


Figure II.2 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude  $L$

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'**azimut**  $\gamma$  : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La **hauteur**  $h$  du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal. [17]

Ces deux angles sont représentés sur la figure II.3

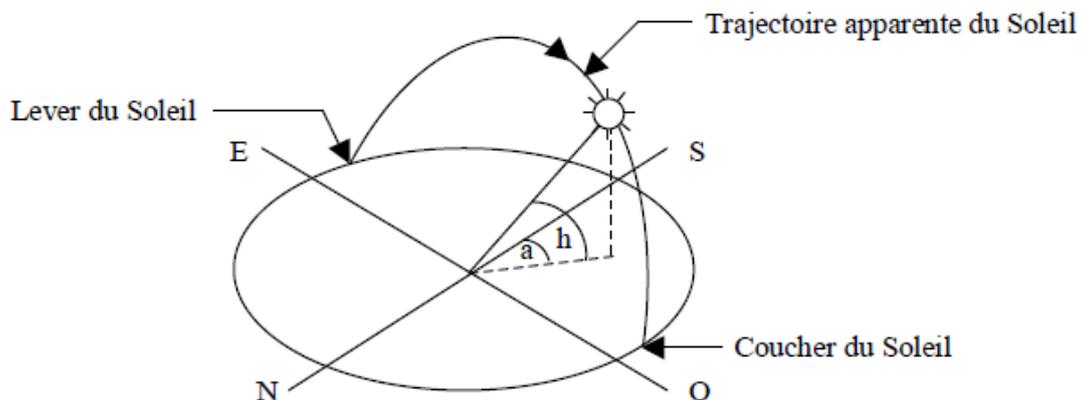


Figure II.3 : Repérage de la position du Soleil.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude  $L$  du lieu

- La date N (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date N servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne sa position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire TS en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

On définit également l'angle horaire ( $\omega$ ) par :

$$\omega = 15^\circ (\text{TS} - 12) \quad (\text{II.3})$$

$\omega$ : est compté positivement l'après-midi.

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (\text{II.4})$$

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(\gamma) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{II.5})$$

### II.3.C- Heures et temps :

- **Durée du jour :**

Le module  $\omega_s$  de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  dans la formule (II.4), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_s) = -\tan(L)\tan(\delta) \quad (\text{II.6})$$

L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(Ts)_l = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{II.7})$$

L'angle horaire  $\omega_s$  au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever. [19].

- **Relation entre temps légal et temps solaire :**

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

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel il se trouve :

$$C = TL - TCF \quad (\text{II.8})$$

(Pour l'Algérie : C= 1h).

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure II.4.

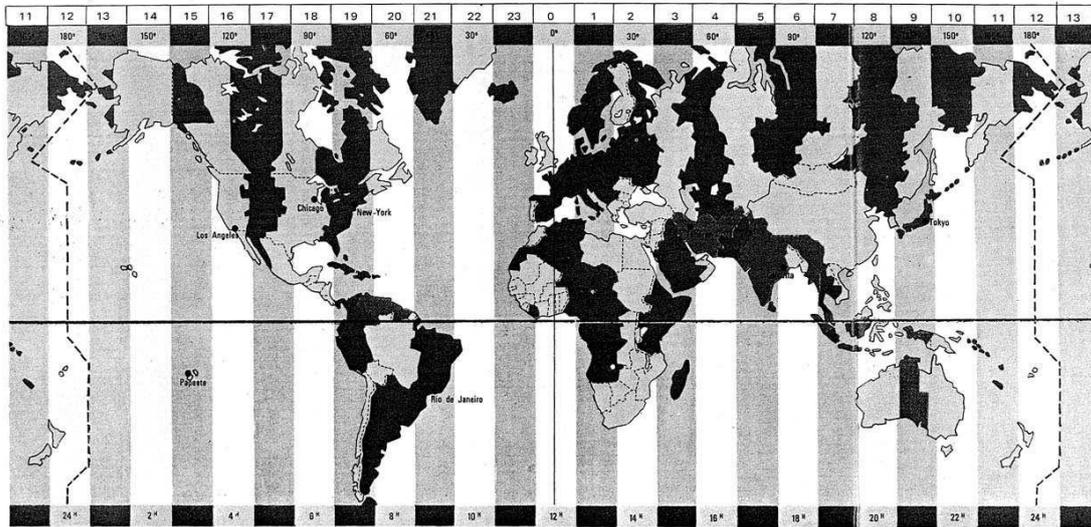


Figure II.4 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

- La différence de longitude ( $L - L_{ref}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule :

$$TS = TL - \frac{L_{ref} - L_{lieu}}{15} + E + C \quad (II.9)$$

Où :

$L_{lieu}$  : Longitude de lieu (noté aussi L).

$L_{ref}$  : Longitude de référence (pour l'Algérie  $L_{ref} = 0^\circ$ ).

C : La correction sur le temps légal (pour l'Algérie C = -1).

E : L'équation du temps (noté ET aussi):

$$E = 9,87\sin(2\beta) - 7,53\cos(\beta) - 1,5\sin(\beta) \quad (II.10)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{360(N-81)}{365}$$

### II.3.D- Durée et taux d'ensoleillement :

- **Durée d'ensoleillement :**

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi

le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages. On appelle *durée effective d'ensoleillement* ou *insolation SS* le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle *rayonnement direct* le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil. [20]

- **Taux d'ensoleillement :**

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$ . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement : [20]

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{II.11})$$

## II.4- Aspects énergétiques :

### II.4.A- Rayonnement solaire au sol :

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- *Le rayonnement direct* est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- *Le rayonnement diffus* est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- *Le rayonnement global* est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le tableau II.1.

<b>Irradiation Solaire</b> Energie reçue pendant une certaine durée $W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou $KWh.m^{-2}.durée^{-1}$	Directe	S	G = S + D
	Diffuse	D	
	Globale	G	
<b>Eclairement Solaire</b> Flux instantané $W.m^{-2}$	Direct	$S^*$	$G^* = S^* + D^*$
	Diffus	$D^*$	
	Global	$G^*$	

Tableau II.1 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I. Nous désignerons par :

- I l'énergie reçue (irradiation) en  $W.m^{-2}.durée^{-1}$  ou  $KWh. m^{-2}.durée^{-1}$
- I\* le flux reçu (éclairage) en  $W.m^{-2}$

Nous avons la relation :

$$S^* = I^* \sin(h) \quad (II.12)$$

❖ **Rayonnement direct :**

• Eclairement  $S^*$

L'éclairement solaire direct  $S^*$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles : [19] [21]

- Par mesure de  $G^*$  et  $D^*$ , on en déduit  $S^* = G^* - D^*$ .
- A partir de la mesure des irradiances journalières globales  $G$  et diffuse  $D$  sur un plan horizontal, on en déduit  $S = G - D$  et  $S^*$  par la fonction de répartition suivante :

$$S^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(w)] \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - \frac{\pi w_s}{180} \cos(w_s)} S \quad (II.13)$$

Où :

$$a = 0.409 + 0.502 \sin(w_s - 60^\circ)$$

$$b = 0.661 - 0.477 \sin(w_s - 60^\circ)$$

- A partir de la mesure de l'irradiation journalière globale  $G$ , on évalue l'irradiation journalière diffuse  $D$  par la corrélation de Collares-Pereira et Rabl :

$$\left. \begin{array}{l} D = 0,99 G \\ D = (1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,648K_T^4) G \\ D = (-0,54K_T + 0,632) G \\ D = 0,2 G \end{array} \right\} \begin{array}{l} K_T \leq 0,17 \\ 0,17 < K_T \leq 0,75 \\ 0,75 < K_T \leq 0,80 \\ K_T \geq 0,80 \end{array} \quad (II.14)$$

Où :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (II.15)$$

$G_0$  : étant l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessous de l'atmosphère calculable par :

$$G_0 = 3,795 \cdot 10^4 \cos(L) \cos(\delta) \left[ \sin(w_s) - \frac{\pi w_s}{180} \cos(w_s) \right] \quad (II.16)$$

Où :  $w_s$  est en degré et  $G_0$  en  $kJ.m^{-2}$

On calcule ensuite  $S = G - D$  et on est ramené au cas précédent.

- A partir de la connaissance de la moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière  $G$ , on calcule l'irradiation diffuse journalière moyenne  $D$  par la corrélation de Collares-Pereira et Rabl :

$$D = \{0,775 + 0,00606(w_s - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455(w_s - 90^\circ)] \cos(115K_T - 103)\} G \quad (\text{II.17})$$

Et on est ramené au 2<sup>em</sup> cas.

A partir de la mesure du taux d'ensoleillement  $\sigma$ , on évalue  $G$  par :

$$\left. \begin{aligned} G &= G_0 [0,29 \cos(L) + 0,52 \sigma] && \text{Zone tropicale} \\ G &= G_0 [\sqrt{2\sigma + 1} - 0,72] && \text{France} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.18})$$

Et on est ramené au cas précédent.

- On ne dispose d'aucune mesure : on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1367 \exp\left[-\frac{TL}{0,9 + 9,4 \sin^2(h)}\right] \quad (\text{II.19})$$

Où  $TL$  est le facteur de Linke calculable par:

$$TL = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1 + 2\beta) \ln(P_v) \quad (\text{II.20})$$

$\beta$ : est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre:

$\beta = 0,05$  en zone rurale

$\beta = 01$  en zone urbaine

$\beta = 0,2$  en zone industrielle ou polluée

$P_v$  : est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

On en déduit  $S^* = I^* \sin(h)$

- Irradiation directe journalière  $S$

L'irradiation directe journalière  $S$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

Par mesure directe de  $G$  et  $D$  on en déduit  $S = G - D$ .

- A partir de  $G$ , on calcule  $D$  par la formule (II.14) et on est ramené au cas précédent.
- A partir de la mesure du taux d'ensoleillement  $\sigma$  on évalue  $G$  par la formule (II.18) et on est ramené au cas précédent.

- Par intégration sur la journée des valeurs de  $S^* = I^* \sin(h)$ ,  $I^*$  étant calculé par la formule (II.19).

### ❖ Rayonnement diffus :

#### • Eclairement $D^*$

L'éclairement solaire diffus  $D^*$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles : [19] [20]

- Par mesure directe.
- A partir de la mesure de l'irradiation journalière diffuse  $D$  sur un plan horizontal, on déduit :

$$D^* = \frac{\pi}{24} [ a + b \cos(w) ] \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - \frac{\pi}{180} \cos(w_s)} \quad (\text{II.21})$$

- A partir de la mesure de l'irradiation globale  $G$  sur un plan horizontal : on évalue  $D$  par la formule (II.17) et on est ramené au cas précédent.
- A partir de la mesure du taux d'ensoleillement  $\sigma$ , on évalue  $G$  par la formule (II.18) et on est ramené au cas précédent.
- Par utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure :

$$D^* = 54,8 \sqrt{\sin(h)} [TL - 0,5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (\text{II.22})$$

Où : TL est le facteur de trouble de Linke calculable par la formule (II.20).

#### • Irradiation $D$

L'irradiation diffuse journalière  $D$  sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction des données disponibles : [19] [20]

- Par mesure directe.
- A partir de la mesure de l'irradiation globale  $G$  sur un plan horizontal : on évalue  $D$  par la formule (II.17).
- A partir de la mesure du taux d'ensoleillement  $\sigma$ , on évalue  $G$  par la formule (II.18) et on est ramené au cas précédent.
- Par intégration des valeurs de  $D^*$  données par la corrélation (II.22) en l'absence de toute donnée.

## II.4.B- Rayonnement solaire sur un plan quelconque :

Soit une surface plane inclinée d'un angle  $i$  par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle  $\gamma$  avec la direction Sud ( $\gamma$  compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global  $G^*(i,\gamma)$  reçu par cette surface est la somme de 3 termes :

$$G^*(i,\gamma) = S^*(i,\gamma) + D^*(i,\gamma) + R^*(i,\gamma) \quad (\text{II.23})$$

Chaque des 3 termes se calculant de la façon suivante :

Éclairement direct:

$$S^*(i,\gamma) = \frac{S^*}{\sin(\delta)(h)} [\cos(h) \sin(i) \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(i)] \quad (\text{II.24})$$

Éclairement diffus :

$$D^*(i,\gamma) = \frac{D^*}{2} [1 - \cos(i)] \quad (\text{II.25})$$

Éclairement réfléchi :

$$R^*(i,\gamma) = \frac{G^*}{2} \rho [1 - \cos(i)] \quad (\text{II.26})$$

Où  $\rho$  est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire,  $\rho$  est appelé l'*albedo*.

On appelle **albédo** le rapport entre énergie réfléchie et énergie incidente.

L'albédo des nuages varie typiquement de 0,4 à 0,9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du Soleil, etc. Les nuages absorbent en outre une fraction du rayonnement solaire, mais celle-ci reste assez faible et ne dépasse pas 10 % de l'énergie incidente pour les nuages les plus épais. [19].

## II.4.C- Variations types du rayonnement :

- **Annuelle :**

La valeur de l'irradiation globale annuelle sur un plan horizontal dépend fortement de la latitude comme le montre la carte de l'ensoleillement sur la figure II.5.

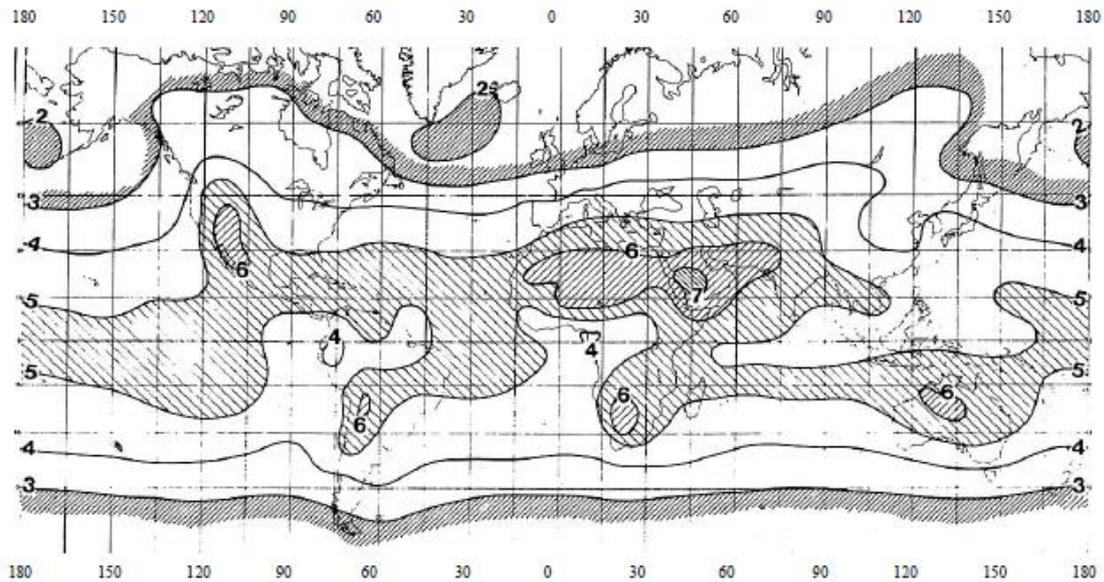


Figure II.5 : Irradiation globale moyenne en  $\text{kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$

La valeur mensuelle moyenne de l'irradiation globale sur un plan horizontal subit également des variations plus ou moins importantes au cours de l'année.

La valeur du flux est élevée et sa valeur minimale est relativement importante en zone tropicale ce qui peut permettre d'envisager des systèmes solaires autonomes sans stockage d'énergie sur une longue période. En dehors de la zone tropicale, les écarts de la valeur de l'irradiation entre le mois le plus ensoleillé et le mois le moins ensoleillé sont importants et il faudra prévoir soit un stockage d'énergie soit une énergie d'appoint pour couvrir un besoin énergétique donné (séchage de produits, production d'eau chaude sanitaire, pompage d'eau,...).

- **Mensuelle :**

En zone tropicale, l'irradiation globale journalière moyenne  $G$  sur un plan horizontal varie peu en saison sèche alors qu'elle subit des variations importantes en saison pluvieuse.

Ceci pose le problème de la sécurité de fonctionnement des systèmes solaires : si l'on veut assurer une couverture complète des besoins chaque jour de l'année, il faut un système de stockage d'énergie permettant de pallier à une période de non-enseillement limitée à 2 jours en zone tropicale sèche. Dans les autres zones où les périodes d'enseillement peuvent être de plus longue durée, il faut obligatoirement utiliser une autre source d'énergie en appoint. Exemple : chauffe-eau électrosolaire où l'eau est chauffée dans un capteur solaire et par une résistance électrique si la température atteinte est insuffisante.

- **Journalière :**

L'éclairement solaire reçu par un capteur varie typiquement de la manière représentée sur la figure II.6 au cours d'une journée non-perturbée : nul la nuit, il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.

Eclairement d'une surface horizontale ( $L = 10^\circ$ ,  $l = 10^\circ$ ,  $j = 150$ )

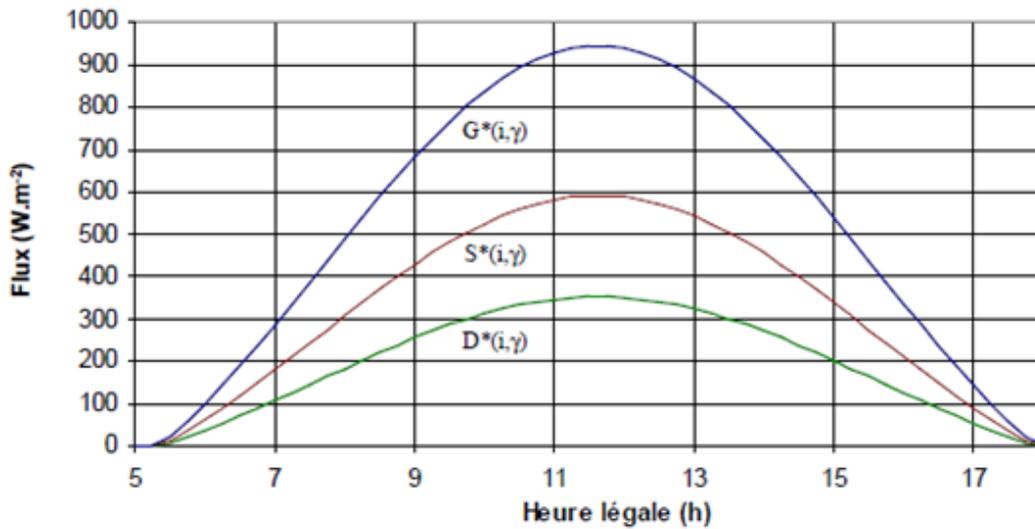


Figure II.6 : Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-perturbée.

L'utilisation de l'énergie solaire est donc bien adaptée aux applications dont les besoins coïncident avec les heures d'ensoleillement maximum. Dans la plupart des cas, il existe un décalage qui nécessite un stockage pour satisfaire les besoins de la période de non-ensoleillement : ballon d'eau chaude associée à un capteur solaire pour les besoins en eau chaude en début de matinée, château d'eau associé à une pompe solaire pour les besoins nocturnes en eau. [21] [22].

## II.4- 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.

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

Tableau II.2 : Ensoleillement du territoire algérien.

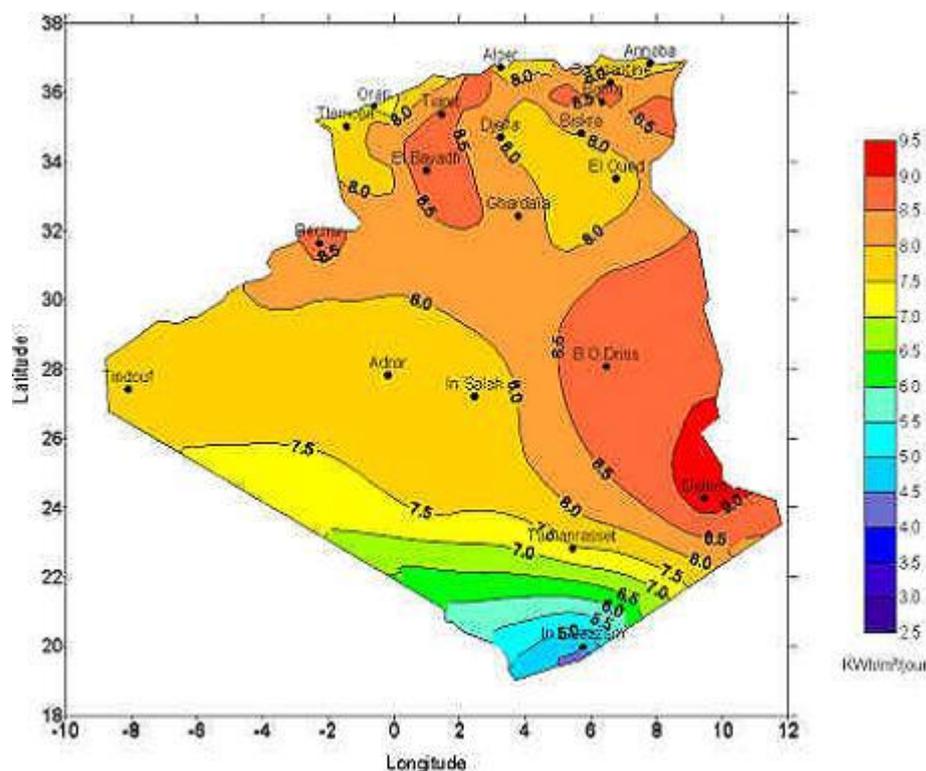


Figure II.7 : Irradiation directe journalière en Algérie (Juillet) [23]

## II.5- 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.

*Chapitre III :*  
*Concentrateur Solaire*

### **III.1- Introduction :**

Le contexte énergétique global dans lequel nous vivons exigerait que les énergies propres et renouvelables constituent la majorité de nos sources d'énergie. Il conviendrait cependant d'affirmer qu'une partie de la solution se trouve... dans le ciel. En effet, le Soleil est à la base de la quasi-totalité de l'énergie que nous utilisons : il permet le cycle de l'eau, la photosynthèse, les courants aériens, etc. Pourtant, nous n'utilisons que très peu l'énergie qui en provient directement sous forme de lumière, alors il ne semble pas fortuit de dire que nous gaspillons l'abondance de cette source d'énergie. Pour remédier à cette situation, il importe de connaître comment exploiter les rayons du Soleil à leur plein potentiel.

Cette énergie peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans, utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre crée par le vitrage, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser la température de 100°C.

Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait être réalisé par concentration de rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires.

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant aisément dépasser les 500 °C et le rendement de conversion est élevé généralement. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations. [25]

Parmi ce type de concentrateurs, il y a les concentrateurs solaires paraboliques. Ces systèmes comportent en général une surface réfléchissante sous forme parabolique destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante, ce qui permet d'avoir une forte augmentation de chaleur. L'avantage d'une telle méthode est de pouvoir atteindre des températures élevées bien adaptées pour le chauffage d'eau (production d'eau Stérilisée et de vapeur d'eau), pour les cuisines solaires et production d'électricité par les moteurs Stirling.

***Aperçu de la technologie :***

Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, 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. [26]

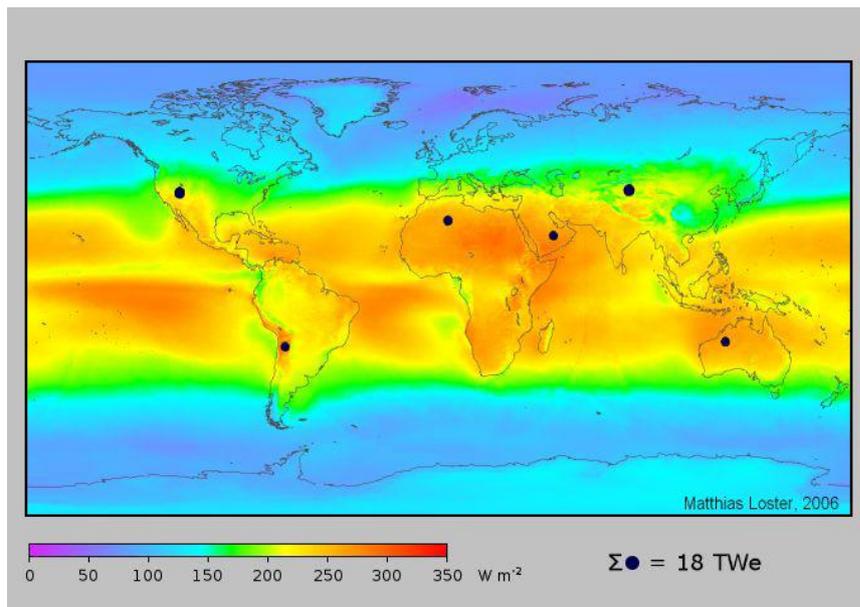


Figure III.1: irradiation solaire moyenne. [26]

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

Les systèmes à concentration en ligne on généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. [26]

### III.2- Le solaire et la thermodynamique - quelque éléments d'histoire :

La connaissance empirique de l'énergie solaire remonte à la nuit des temps. Les Egyptiens connaissaient le phénomène d'effet de serre depuis 300 av.J.C. Socrate a décrit les utilisations courantes du solaire passif au IV<sup>e</sup> siècle av.J.C. [27]

Une légende de l'antiquité attribuée à Archimède, en 213 av.J.C la destruction de flotte Romaine et le sauvetage de Syracuse (figure III.2) grâce à des miroirs concentrant la chaleur solaire. Si cet «exploit» est un mythe apparu plus de 4 siècles après le siège de la cité sicilienne, le phénomène de concentration était connu et utilisé depuis déjà plusieurs siècles : la flamme olympique était traditionnellement allumée à l'aide de miroirs concaves, [28] et la même technique est mentionnée en 672 av.J.C. en Chine. [29] Il est également notoire que l'idée d'un concentrateur à la géométrie optimisée est due à Dositheus en 230 av.J.C. Dioclès démontre vers 190 av.J.C. que le profil d'un tel concentrateur est parabolique.

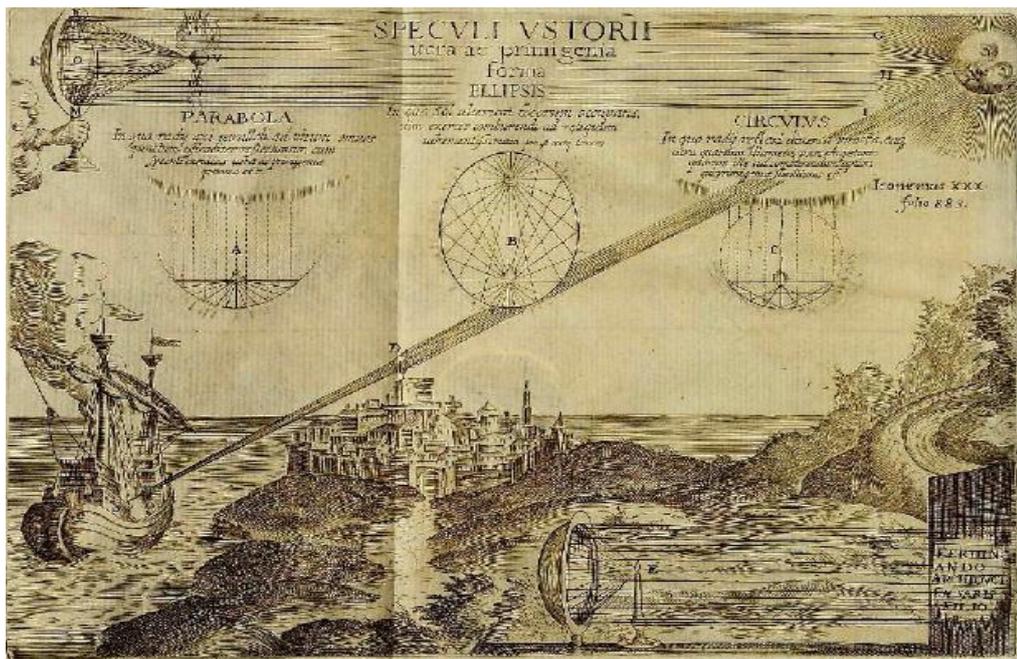


Figure III.2 : Illustration de la légende de la destruction de la flotte romaine à Syracuse par Archimède.

Le plus ancien témoignage de l'utilisation de chaleur pour créer un mouvement remonte au premier siècle ap.J.C. Dans « Pneumatica » [30], ouvrage en deux volumes consacrés à l'air et à la vapeur, Héron d'Alexandrie décrit divers appareils, dont leolypile (figure III.3), une petite machine à réaction ancêtre de nos turbines actuelles. L'engin – dont la paternité de l'invention n'est pas certaine – était davantage décrit comme un objet de physique amusante.

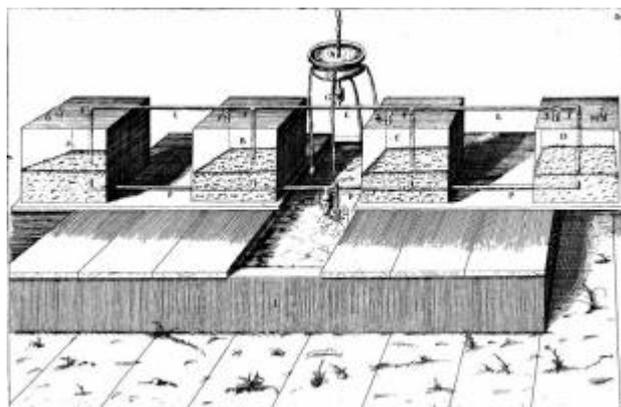
Un autre appareil, plus surprenant est une ébauche de pompage solaire utilisant un astucieux – bien qu’imparfait [31] – système de siphon. Dans le même ouvrage, dénonçant une supercherie des prêtres de l’ancienne Egypte, Héron décrit un appareil remarquable : Un mécanisme faisait s’ouvrir des portes d’un temple lorsqu’un feu s’y éteint, et se fermer une fois le foyer ravivé : Il s’agit là du plus ancien témoignage de machine thermodynamique imaginée et mise en œuvre. La description de cette machine fut reprise à diverses reprises dans la littérature [31].

L’exploitation thermique de l’énergie solaire est restée marginale jusqu’au XVII<sup>e</sup> siècle, cantonnée à de petits dispositifs souvent restés à l’état de plan. Les inventeurs, malgré une connaissance uniquement empirique des phénomènes physiques, n’en étaient pas prolifiques et sensés.



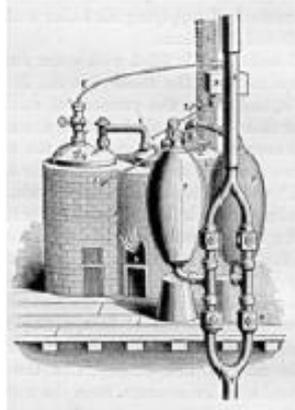
*Figure III.3 : L’éolypile décrite par Héron.*

Parmi de nombreux ingénieurs de la renaissance, Léonard de Vinci dessina le plan de principe de la concentration linéaire, redécouvert bien plus tard avec les travaux d’Augustin Fresnel, ainsi que Salomon de Caus qui imagina vers 1617 une fontaine actionnée par l’énergie solaire (figure III.4), dont le principe est parfaitement viable et dont l’idée inspira de nombreux inventeurs par la suite. [32]



*Figure III.4 : La fontaine solaire de Salomon de Caus (1615).*

Thomas Savery, conçut en 1698 la première machine à vapeur à usage industriel. Ce type de machine fut utilisé à l'exhaure de mine de Cornouaille durant plusieurs dizaines d'année.



*Figure III.5 : La pompe à feu de Savery 1698*

Denis Papin qui avait imaginé, quelques années auparavant une transmission pneumatique, la « machine à transporter au loin la force de rivières », combina ses idées avec celles de Salomon de Caus et Savery pour créer en 1690 le premier piston à vapeur, et dès 1704 il utilise ce principe pour actionner les aubes d'un bateau. [33]

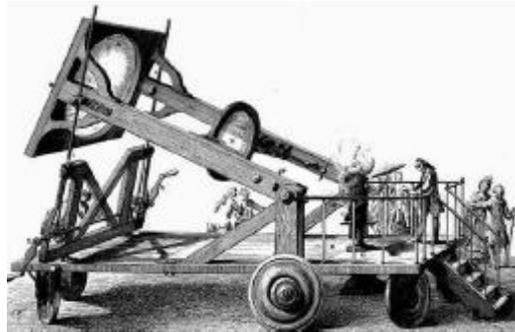
Toutefois ses idées ne furent pas oubliées : En 1711 Thomas Newcomen fabriquait la première pompe à balancier commercialisable [34], qui évolua de manière empirique. Entre 1765 et 1769 James Watt apporta des améliorations techniques majeures, en premier lieu la séparation de chaudière et du condenseur, en second lieu le bouclage de l'eau en circuit fermé et enfin l'entraînement d'un vilebrequin par le piston de détente de vapeur par l'intermédiaire d'un embiellage : le moteur était né. Il faudra encore un siècle avant que n'apparaisse l'association de capteurs solaires et d'un moteur.



*Figure III.6 : Glace plane orientable du miroir de Buffon.*

Dans l'esprit de la physique émergente du XVIII<sup>e</sup> siècle, la légende des "miroirs ardents"

d'Archimède était bien connue, et généralement controversée. Aussi, pour vérifier son intime conviction en faveur du mythe ancien, L. C. De Buffon fit construire en 1747 un "miroir composé de 188 glaces planes" orientables (figure III.6). Il expérimenta le pouvoir inflammatoire à diverses distances et la fusion des métaux avec son dispositif [35], dont le principe est aujourd'hui mis en application dans les centrales à tour solaire.



*Figure III.7 : Le four solaire de Lavoisier.*

En 1773 Antoine de Lavoisier utilisa un four solaire utilisant deux lentilles convergentes afin de fondre diverses matières sans utiliser de combustible. Il réussit à réaliser la fusion du platine [36], soit une température atteinte de 1800°C. A la même époque diverses expériences sont menées en Allemagne sur la fusion solaire des métaux à l'aide de miroirs paraboliques.

Plus connu comme naturaliste et géologue, Horace-Bénédict de Saussure réalise vers 1784 différentes études expérimentales sur l'utilisation de l'énergie solaire. Il réalise notamment un capteur solaire permettant d'atteindre un peu plus de 100°C, utilisant les principes de l'effet de serre et de la sélectivité optique, tout comme les capteurs plans actuels. Remarquant l'indépendance entre le rayonnement et la température ambiante, il envisage la possibilité d'utilisation pratique de l'énergie solaire à des fins domestique pour le chauffage et la cuisson alimentaire. [33]

Au XIX<sup>e</sup> Siècle, la machine à vapeur, déjà outil de la révolution industrielle naissante en Grande-Bretagne, n'était pas sans poser de problème. Les procédés de fabrication ne permettaient pas de fabriquer des chaudières fiables et résistantes et on déplorait de nombreux accidents, notamment des explosions de chaudières surchauffées ont fait de nombreuses victimes. Pour pallier à ce problème certains inventeurs eurent l'idée d'utiliser du gaz pour développer de la puissance mécanique dans un piston, en lieu et place de la vapeur. La première tentative fructueuse est due à Sir G. Cayley en 1807, [37] son idée était le grand principe de tous les moteurs à cycle ouvert : comprimer l'air frais, qui servait de comburant

dans un foyer avant d'atteindre la chambre de détente. Le sens de circulation de l'air et des fumées étant assuré par de simple clapets, le taux de compression était très bas et pas conséquent le rendement de cette machine très faible.

En 1816, Robert Stirling eut une idée autrement intéressante : son brevet décrit non seulement un moteur à gaz à cycle fermé, sans clapet ni soupapes, qui supprime le problème de l'encrassement de la chambre de détente, mais a également l'idée révolutionnaire de "l'économiseur", qui nous appelons aujourd'hui régénérateur, dispositif permettant de stocker puis récupérer de la chaleur sensible lors des allers et retours du gaz de travail depuis la chambre de détente vers la chambre de compression, améliorant ainsi le rendement. Si les premières machines de Stirling étaient relativement peu puissantes et efficaces, simplicité et fiabilité leur valurent d'être les premiers moteurs à gaz à être fabriquées industriellement (figure III.8).

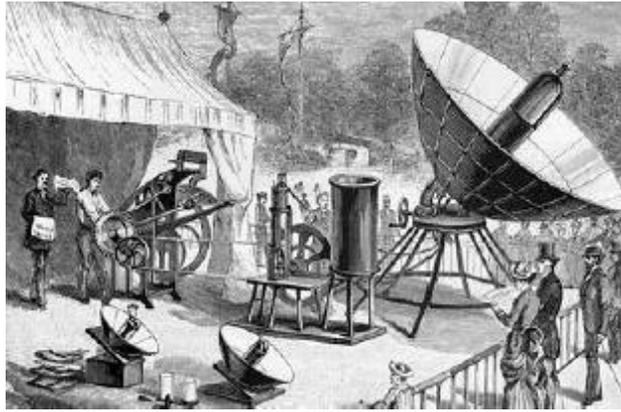


*Figure III.8 : quelques moteurs de Stirling anciens.*

Moteur Louis Heinrici "universel" (Allemagne, fin XIX<sup>e</sup> début XX<sup>e</sup>) dont ma gamme s'étendait d'un diamètre de cylindre 26mm à 199mm, ce type de moteur fut commercialisé jusqu'en 1941. Un petit moteur Heinrici conçu pour animer un piano mécanique. Une pompe à eau "Rider" fabriquée par Ericsson en 1880.

Comment ne pas citer Sadi Carnot? La publication de ses *Réflexions* en 1824 [38] n'eut pas un effet immédiat, mais ses travaux, repris entre autres par Clapeyron en 1834 et Clausius en 1850, posèrent les fondations de la thermodynamique classique, dont l'émergence eut des conséquences notoires sur les performances des moteurs et tout le domaine de l'énergétique.

En 1838, Claude Pouillet invente le pyréliomètre [39] qui lui permet la première estimation de la constante solaire à  $1,7633 \text{ cal.cm}^{-3}.\text{min}^{-1}$ , soit  $1231 \text{ W.m}^{-2}$ , valeur relativement proche de celle de  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  avec des fluctuations de +/-5%, admise aujourd'hui.



*Figure III.9 : L'imprimerie Solaire d'Augustin Mouchot au jardin des Tuileries en 1880.*

Ces travaux inspirent Augustin Mouchot qui, reprenant -entre autres- les idées de Saussure, effectue expérimente la cuisson et la distillation solaire dès 1860. Il relate ses expériences dans un ouvrage [32] publié en 1869, qui servit par la suite de référence quant à l'exploitation de l'énergie solaire et invente le concentrateur tronc-conique en 1875.

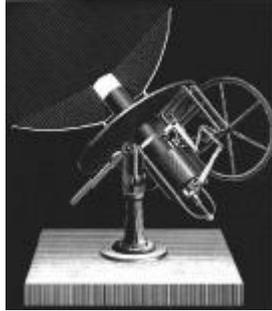
Il construisit plusieurs moteurs à vapeur alimentés par énergie solaire, dont les plus célèbres furent un pompe à alimentation solaire, très remarquée lors de l'exposition universelle de Paris en 1878 ; puis une machine similaire présentée en 1880 à l'exposition du jardin des Tuileries (figure III.9), par son assistant Abel Pifre, qui entraînait une presse mécanique imprimant le "journal soleil".

Un autre précurseur incontournable est John Ericsson : entre 1868 et 1875 il se consacra à l'étude de l'alimentation solaire des machines et fabriqua sept prototypes. Il déclare au journal de Genève du samedi 24 octobre 1868 : *"Archimède, ayant calculé la puissance du levier, expliquait qu'à l'aide de ce levier on pouvait mouvoir la terre. J'affirme qu'en condensant les rayons du soleil, on peut créer une force capable d'arrêter la terre dans sa marche."*

Ses recherches furent publiées dans « *Solar Investigations* » (New York, 1875) ; et dans « *Contributions to the Centennial Exhibition* » (New York, 1876) ; il y présente une de ses inventions les plus remarquables du genre : un moteur à air à cycle fermé alimenté directement en chaleur par un concentrateur parabolique : ni plus ni moins que le premier Dish-Stirling au monde. Il a également réalisé le premier couplage d'une machine à vapeur à un capteur cylindro-parabolique (figure III.10 et III.11).

L'intention de ces études n'était pas de supplanter la machine à vapeur, alors en pleine expansion, mais de proposer une alternative aux combustibles tels que le bois et charbon, pour

les régions où l'approvisionnement est difficile, mais où l'ensoleillement est quasi-permanent. Il pensait aussi que son invention, bien que de peu d'intérêt commercial à l'époque, pourrait à l'avenir répondre à la problématique de l'épuisement des ressources fossiles.



*Figure III.10 : La machine solaire de John Ericsson.*



*Figure III.11 : Photographie du premier dish-Stirling réalisé par Ericsson.*

L'article présentant les projets de John Ericsson dans le journal de Genève du 24 Octobre 1868, laissait transparaître une pointe d'incrédulité. L'histoire et la littérature [40] retiendra néanmoins les précurseurs de la conversion thermodynamique de l'énergie solaire, qui ont les bases des techniques actuelles dans ce domaine renaissant.

Par la suite, la première guerre mondiale, puis la seconde, et surtout l'émergence des carburants pétroliers comme source d'énergie efficace, pratique et bon marché, a fait tomber l'énergie solaire dans l'oubli jusque dans les années 1970. La hausse brutale du prix du pétrole brut en 1974 avait lancé une course aux énergies alternatives dans les pays industrialisés. Dans cette effervescence plusieurs plates-formes d'expérimentation des technologies solaire ont vu le jour aux Etats Unis d'Amérique (Albuquerque, NM et Bastrow, CA), en Espagne (PSA, Almeria), en France (Thémis, Targasonne), qui ont posé les bases de développement de la production d'électricité par concentration solaire. Le retour du pétrole bon marché en 1986 et sa relative stabilité dans les années 90 ont eu pour conséquences des politiques énergétiques moins favorables au solaire qui tombe quasiment dans l'oubli.

Dans le début des années 2000, la prise de conscience générale de la problématique environnementale et climatique, concrétisée par les accords de Kyoto en 1997, ainsi que le flou sur l'étendue des réserves d'énergies fossiles, ont relancé les efforts pour élargir la diversité énergétique avec un regain d'intérêt notoire pour l'énergie solaire, selon une approche révisée et des objectifs ambitieux. [41]

Il est aujourd'hui reconnu que « la plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques autour de l'équateur », [42] d'une manière générale que l'énergie solaire est la seule ressource énergétique (renouvelable et fossiles compris) capable de pourvoir à la totalité de la demande énergétique mondiale sur le très long terme.

Le projet DESERTEC-EUMENA estime possible d'ici à 2050 la construction au Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA : Middle East And Nord Africa) de centrales suffisantes, outre à fournir la demande locale, pour exporter 200 GWe à 300 GWe, vers l'Europe via des lignes à courant continu sous haute tension (ou HDVC : High-Voltage-Direct-Current), soit une capacité de 700 TWh/an. [43] autrement dit l'équivalent de la production d'électricité d'origine nucléaire de toute l'Europe en 2012.

### **III.3- La Concentration Solaire :**

Une centrale solaire thermodynamique à concentration ou (*centrale solaire thermique à concentration*) ou encore (*héliothermodynamique*), en anglais CSP (*Concentrating Solar Power Plant*) est une centrale qui concentre les rayons du Soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité.

Les technologies solaires thermodynamiques présentent un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles permettent de prolonger la production d'électricité au-delà de la période d'irradiation solaire, moyennant un investissement additionnel, en stockant le fluide caloporteur dans des réservoirs pour pouvoir en extraire la chaleur plusieurs heures après le coucher du Soleil. [44]

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés.

Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1 000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité (on parle parfois « *d'électricité solaire thermodynamique* »). D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène. [45]

Lorsqu'une surface d'un matériau est directement éclairée, les propriétés physiques de celle-ci font qu'une partie du rayonnement solaire est réfléchi, une autre est transmise et le reste est absorbé. La fraction absorbée est alors convertie en chaleur et la température moyenne du matériau augmente jusqu'à atteindre un équilibre dépendant principalement de l'intensité du rayonnement solaire, de l'absorptivité du matériau et des pertes thermiques par convection et par rayonnement thermique [46].

### **III.3.A- Le principe de concentration :**

Le principe de la concentration de l'irradiation solaire est connu depuis l'Antiquité, comme l'illustre le mythe des « miroirs ardents » d'Archimède. Le plus souvent grâce à des miroirs réfléchissants ou des loupes, un système à concentration réoriente le rayonnement solaire collecté par une surface donnée sur une cible de dimension plus réduite : le démarrage d'un feu de feuilles mortes avec une loupe utilise ce principe.

### **III.3.B- Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques :**

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, [45] les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling.

### III.3.C- Initiatives internationales :

L'AIE (Agence Internationale de l'Energie) a établi dès 1977 un programme de coopération (Solar PACES) portant sur la Recherche et Développement dans le domaine de la concentration de l'énergie solaire. Quinze pays dont la France y participent.

Des initiatives internationales ont également été engagées dans ce domaine comme le Plan Solaire Méditerranéen, un partenariat entre les pays riverains de la Méditerranée et l'Union européenne ayant pour but de lancer des projets régionaux. Un projet privé, *Désertec*, initié en 2003 par des industriels allemands, affiche d'importantes ambitions. [47]

### III.3.D- Les trois familles de centrales solaires à concentration :

On distingue en général trois grandes familles de centrales solaires à concentration schématisées sur la Figure 1.3 ; les centrales à concentrateurs linéaires, les centrales à tour et les systèmes Parabole/Stirling. Ils se distinguent principalement par leurs dispositifs concentrateurs. Ces concentrateurs se différencient par leurs dimensions élémentaires, leurs coûts, et leurs performances optiques. [48]

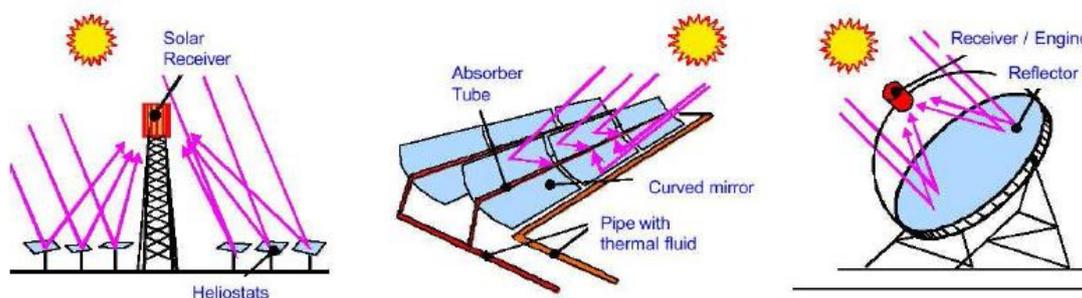


Figure III.12 : Les trois familles de centrales solaires thermodynamiques.

### III.4- Les systèmes Paraboles/Stirling :

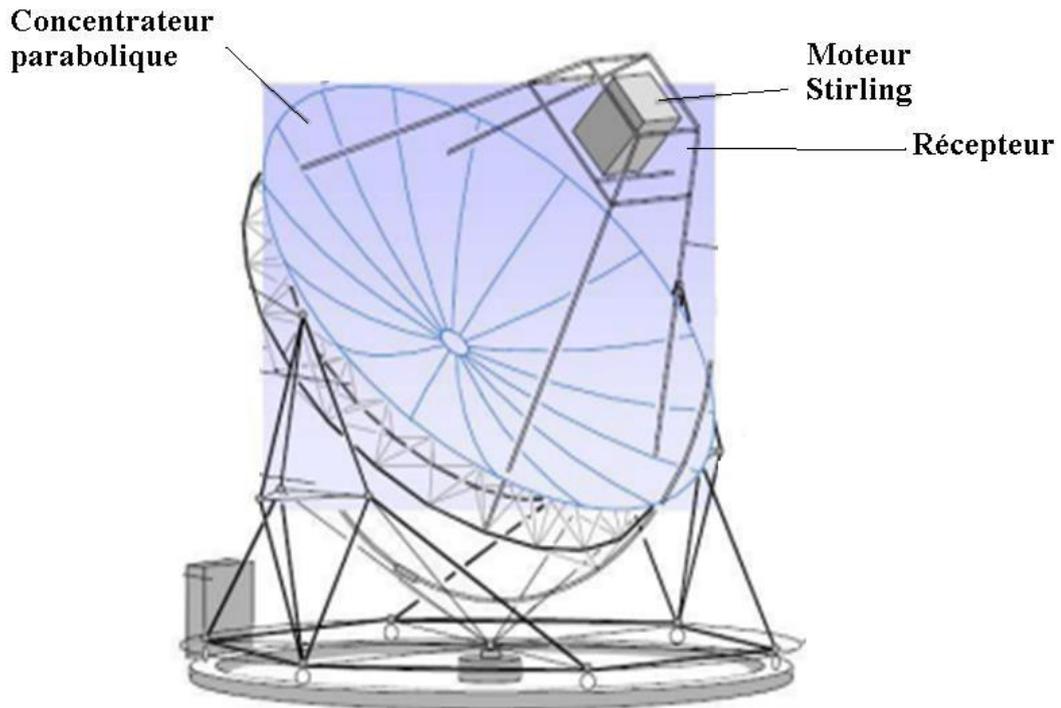
Les systèmes compacts de type Parabole/Stirling sont les dispositifs permettant de convertir l'énergie solaire thermique en électricité qui offrent le meilleur rendement (de l'ordre de 20 % - 31 %) à l'échelle de la dizaine de kWe. Les autres systèmes fondés sur la conversion de l'énergie solaire concentrée, c'est à dire les technologies à tour et à concentrateurs cylindro-paraboliques, ne permettent d'atteindre ces rendements qu'à l'échelle du MWe ou plus.

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. [49]



*Figure III.13: Concentrateur 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.



*Figure III.14 : Schéma du concentrateur parabolique à moteur Stirling*

### **III.4.A- Description du système Parabole/Stirling :**

Le convertisseur Parabole/Stirling est constitué de 3 éléments principaux ; le concentrateur solaire, le récepteur solaire placé au foyer du concentrateur, et le moteur Stirling couplé à une génératrice électrique. A ces éléments principaux s'ajoute le système de contrôle-commande, les auxiliaires indispensables pour assurer de manière autonome la régulation de la production et la sécurité du fonctionnement.

Le fluide de travail est alternativement chauffé et refroidi dans un cycle fermé. Il se détend lorsqu'il est chauffé dans le récepteur solaire (source chaude) et il est comprimé lorsqu'il est refroidi par un circuit d'eau au niveau de la source froide. La puissance récupérable sur l'axe moteur est la différence entre le travail fourni lors de la détente du fluide et le travail utilisé par le fluide lors de sa compression. Le schéma de la Figure III.15 illustre les différents éléments constitutifs du système.

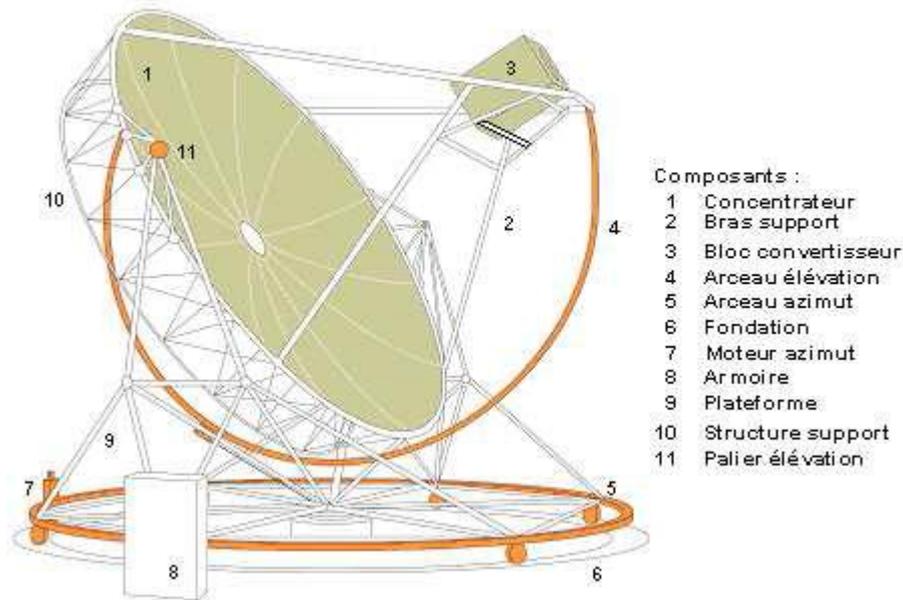


Figure III.15 : Le système Parabole/Stirling

### III.4.B- Le concentrateur :

Le concentrateur solaire utilisé pour les systèmes Parabole/Stirling est le concentrateur parabolique. Une surface réfléchissante, concentre les rayons lumineux provenant du soleil dans une zone appelée foyer. La contrainte majeure est d'orienter en permanence l'axe de la parabole dans la direction du soleil. La nécessité de mobiliser la parabole selon deux axes pour suivre la course du soleil est la limite principale de la puissance de ce type de système.

Le plus grand prototype de concentrateur parabolique, the big dish (Figure III.16) se trouve en Australie et atteint la taille considérable de 400 m<sup>2</sup> ce qui constitue une véritable prouesse technologique [50]. La plupart des concentrateurs paraboliques se situe dans une gamme entre 50 et 100 m<sup>2</sup>. La taille du concentrateur est déterminée par la puissance nécessaire pour faire fonctionner le moteur Stirling à sa puissance nominale. Un moteur de 10 kWe aura approximativement besoin d'un concentrateur de 8 m de diamètre et un système de 25 kWe requiert une parabole de diamètre d'environ 10 m. Outre le système de déplacement qui doit être précis et robuste, l'autre difficulté majeure sur le plan technologique est de réaliser une surface réfléchissante parabolique. De nombreux concentrateurs paraboliques ont été testés dans les années 80 utilisant différentes surfaces réfléchissantes, différentes géométries, et différents systèmes de suivi du soleil.



*Figure III.16: The big dish de 400 m<sup>2</sup> de l'Australian National University à Canberra[50]*

➤ **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%. [51]



*Figure III.17 : Visualisation du miroir*

➤ **La structure :**

On relève 5 techniques de fabrication des concentrateurs ; les trois premières visent à singer une parabole parfaite, les deux autres conduisent à des optiques mixtes constituées de facettes concentratrices (paraboliques ou sphériques) montées sur une parabole [52] :

- Membrane métallique ou polymère, flexible, placée sur un tambour dans lequel est maintenu un vide partiel (technique dite « *stretched membrane* »). La forme prise par la membrane est proche d'une parabole. Cette technique a été pionnière dans les années 80. Cette technique a révélé des problèmes de tenue des matériaux et fragilise l'ensemble, elle est aujourd'hui réservée à des paraboles de plus petit diamètre.
- Parabole formée de 12 éléments (« *pétales* ») en composite résine (époxy/fibre) de verre sur lesquels sont collés des miroirs élémentaires en verre mince avec un dépôt d'argent en face arrière. La concentration moyenne de ce type de concentrateur atteint 4000 soleils avec un pic de concentration de 10000 soleils.
- Parabole formée de facettes trapézoïdales juxtaposées, chaque facette est constituée d'un miroir posé sur un nid d'abeille en aluminium très léger pris en sandwich entre deux feuilles d'acier. L'ensemble offre de bonnes performances optiques et mécaniques. La concentration maximale est d'environ 10000 soleils [53].
- Assemblage de miroirs élémentaires concentrateurs et orientables individuellement, montés sur une structure de forme parabolique. Ce type de concentrateur est performant (concentration moyenne de plus de 3000 soleils pour un pic de 8000 soleils) mais le coût est élevé et il exige un réglage fin du pointage de chaque miroir.
- Assemblage de miroirs élémentaires paraboliques sur une structure de forme parabolique. Chaque miroir utilise la technique « *stretched-membrane* ». Les miroirs sont réglés individuellement. La concentration moyenne est voisine de 1500 soleils et la concentration maximale de 3500 soleils.



Figure III.18 : Les différents types de concentrateurs paraboliques.

➤ **Le système de poursuite : la mécanique et le pilotage :**

Les technologies pour la poursuite du soleil ont partagé les progrès avec ceux réalisés sur les héliostats réflecteurs pour les centrales à tour. Dans les deux cas une précision de pointage meilleure que le milli radian est exigée. Deux montures sont utilisées pour positionner l'axe du concentrateur sur la direction du soleil ; la monture altazimutale ou la monture équatoriale (Figure III.19). Pour cette dernière, l'ensemble tourne autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation de la terre (axe polaire) d'environ  $15^\circ$  par heure (vitesse de rotation de la terre). Le second axe de rotation est perpendiculaire au premier et effectue les corrections lentes et de faible amplitude pour se maintenir à la hauteur du soleil. Quelques prototypes ont initialement mis en œuvre la monture équatoriale, moins gourmande en énergie, mais aujourd'hui tous les systèmes Parabole/Stirling utilisent la monture altazimutale, universelle et plus facile à mettre en œuvre ; l'ensemble tourne autour de deux axes, l'un parallèle à la terre (élévation), et l'autre perpendiculaire (azimut).

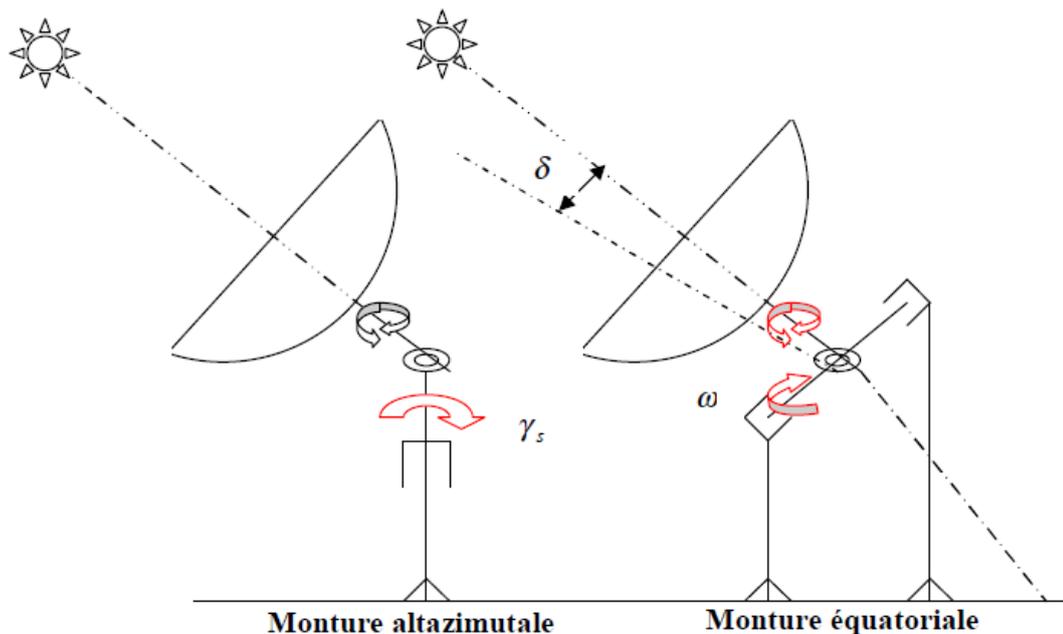


Figure III.19 : Les deux types de monture pour le suivi du soleil

### III.4.C- 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 [54].

L'augmentation du facteur d'interception augmentera la fraction de l'énergie entrante dans le récepteur, bien que ce 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.

### III.4.D- Le récepteur solaire :

Le récepteur solaire convertit le rayonnement solaire concentré en chaleur utilisable par le fluide de travail du moteur Stirling. Le récepteur est le composant le plus chaud du système en fonctionnement normal. L'efficacité du récepteur solaire traduit son aptitude à transférer le maximum de puissance radiative incidente au fluide caloporteur à la température de travail en supportant des pertes thermiques minimales. L'élément actif du récepteur est l'absorbeur, échangeur thermique parcouru par le fluide caloporteur et éclairé par le rayonnement solaire.

L'absorbeur est placé au fond d'une cavité ou bien il en épouse les parois. L'ouverture de la cavité est située dans le plan focal du concentrateur ou dans un plan très proche. La cavité est destinée à diminuer les pertes par réflexion (piéger le rayonnement solaire), les pertes par convection, les pertes par re-rayonnement depuis la surface chaude de l'absorbeur, et à atténuer la non uniformité du flux solaire sur l'absorbeur (redistribuer le flux par réflexions internes). [55]

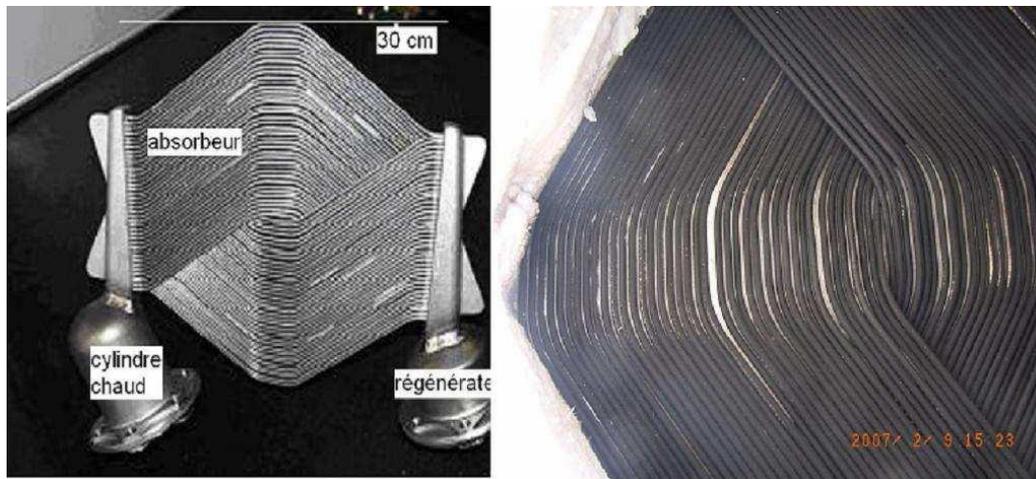


Figure III.20 : Récepteurs solaires

### III.4.E- 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.

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

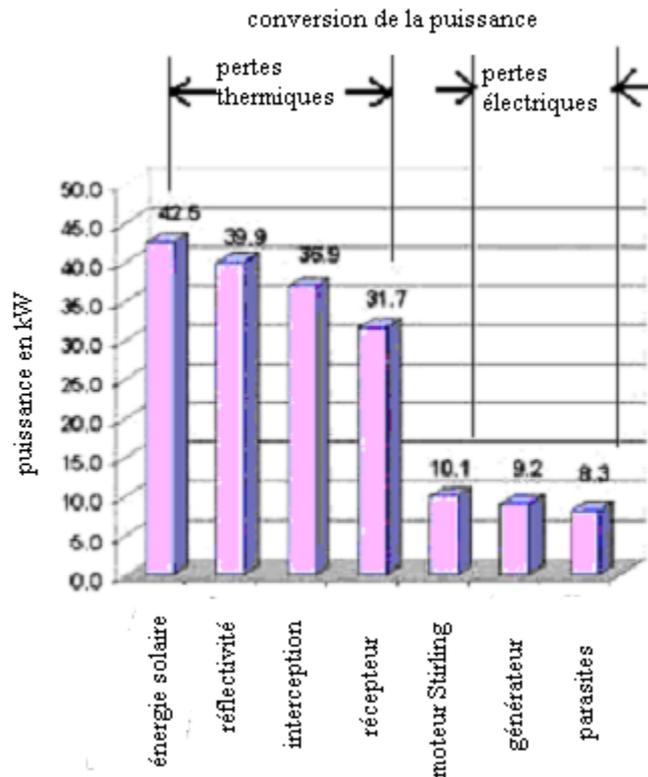


Figure III.21 : Cascade d'énergie pour le système SBP à 1000 [W/m²] : niveau de l'insolation [56]

### III.4.F- 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.

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. [57]

### **III.4.G- Régénérateur :**

Un régénérateur se compose de disques métalliques, il est employé souvent dans des moteurs Stirling pour améliorer le rendement du moteur [58].

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 est préchauffé 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 que le fluide de travail partira de la proximité du régénérateur à la température de l'espace qu'il occupe [59].

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.

### **III.4.H- 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 III.22.

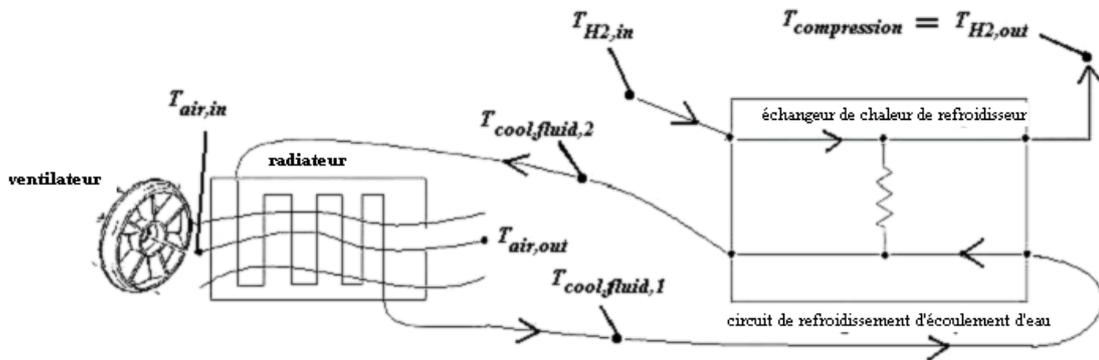


Figure III.22 : Système de refroidissement pour la technologie parabolique Stirling

### III.5- Conclusion:

Parmi les technologies de concentration solaire, nous nous focalisons sur les systèmes paraboliques à moteur Stirling.

Dans ce chapitre nous donnons une présentation bien détaillée sur les performances des composantes de notre système étudié (concentrateur parabolique, récepteur, régénérateur, et système de refroidissement).

Les installations solaires à concentration de type parabole-Stirling font partie des projets de production d'énergie prometteurs. Sur le plan énergétique, le rendement terminal est relativement important.

La possibilité d'installer cette technologie dans des zones isolées est également un atout, avec à la clef l'approvisionnement en énergie électrique de régions ne pouvant pas être ravitaillées par des moyens conventionnels. Par rapport à beaucoup d'autres énergies renouvelables, la centrale Dish-Stirling a également l'avantage d'être composée de matériaux plus facilement recyclables, ce qui s'inscrit mieux dans l'idée de développement durable.

Le coût énergétique pour sa production en est de même moins élevé, à puissance égale, que celui d'une installation photovoltaïque.

Au niveau mécanique, très peu de problèmes de résistance aux éléments extérieurs ont été observés. De plus, les moteurs Stirling sont des modèles de fiabilité et de longévité, avec une maintenance très faible et un fonctionnement régulier.

*Chapitre IV : Calcul et  
Simulation du Système  
Parabole-Stirling*

## IV.1- Simulation des systèmes de concentration :

On utilise Tonatiuh pour modéliser un système solaire parabolique et de simuler son comportement optique.

La parabole nous allons simuler est composé d'un miroir parabolique et un récepteur de disque plat situé dans le plan focal du miroir et centrée au point focal.

Nous allons utiliser les valeurs suivantes pour les paramètres définissant la géométrie de plat et le récepteur:

*Miroir parabolique :*

Rayon = 4.25 mètres

Longueur focale = 4.5 mètres

*Appartement récepteur de disque :*

Rayon = 0,06 mètres

### IV.1.A- Simulation du système de concentration :

Après le démarrage de Tonatiuh version 2.0.1, procédez comme suit:

Ajouter un groupe de nœuds à RootNode et l'étiqueter "ConcentratingSystem".

Ajouter un groupe de nœuds à la "ConcentratingSystem" et l'étiqueter "ParabolicDish".

Ajouter un second nœud de groupe à la "ConcentratingSystem" et l'étiqueter "Receiver".

Après avoir fait cela, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:

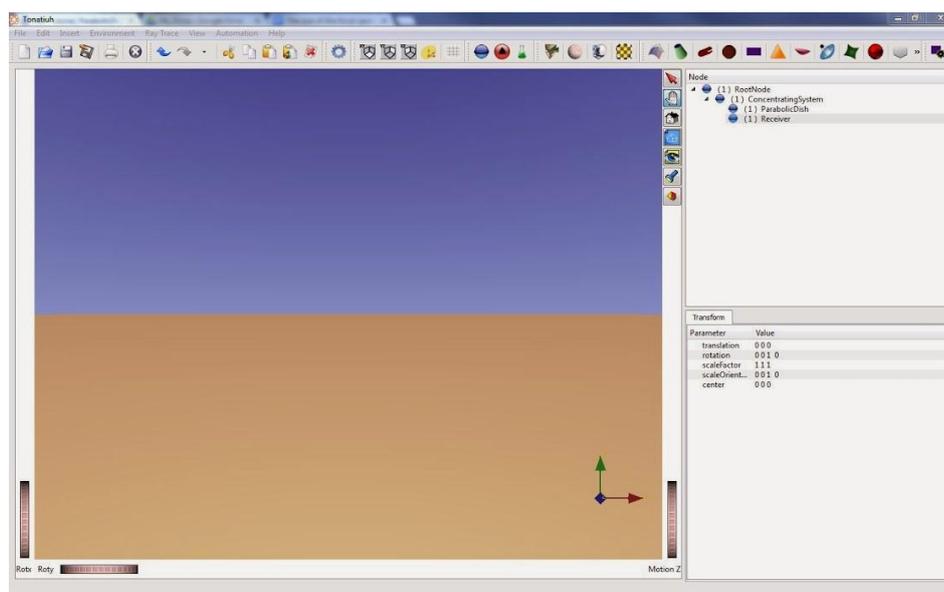


Figure IV.1 : capture écran de la facette de Tonatiuh.

La vue 3D volet situé à gauche de l'interface utilisateur graphique de Tonatiuh ne montre pas de surfaces, puisque nous ne les avons pas encore définies. La vue du volet symbolique situé à droite de l'interface graphique de Tonatiuh montre la structure arborescente *Node Group* nous venons de créer. Dans cette structure arborescente, les nœuds du groupe représentent des trames de référence en trois dimensions. Chacun de ces cadres de référence peut être traduit et mis en rotation par rapport à la trame de leurs parents de référence. Les dimensions le long des axes de chaque trame de référence peuvent être redimensionnées indépendamment. Par défaut, crée Tonatiuh la note du groupe avec le plan x-z comme étant le plan horizontal et l'axe des ordonnées comme axe vertical, vers le haut positifs.

➤ **Modélisation de parabole :**

Cliquez sur le Groupe de nœuds "ParabolicDish" pour le sélectionner. Ajoutez à cela un nœud de surface et de garder l'étiquette automatique "TShapeKit1" fourni par Tonatiuh.

Cliquez sur le nœud de surface juste créé "TShapeKit1" et y ajouter:

Un nœud " Parabolic\_Dish".

Un nœud "Specular\_Standard\_Material".

Après avoir fait cela, si vous sélectionnez dans le menu "Affichage" l'option "Edit Mode" et mettre en place les quatre fenêtres de la vue 3D du volet de manière appropriée, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:

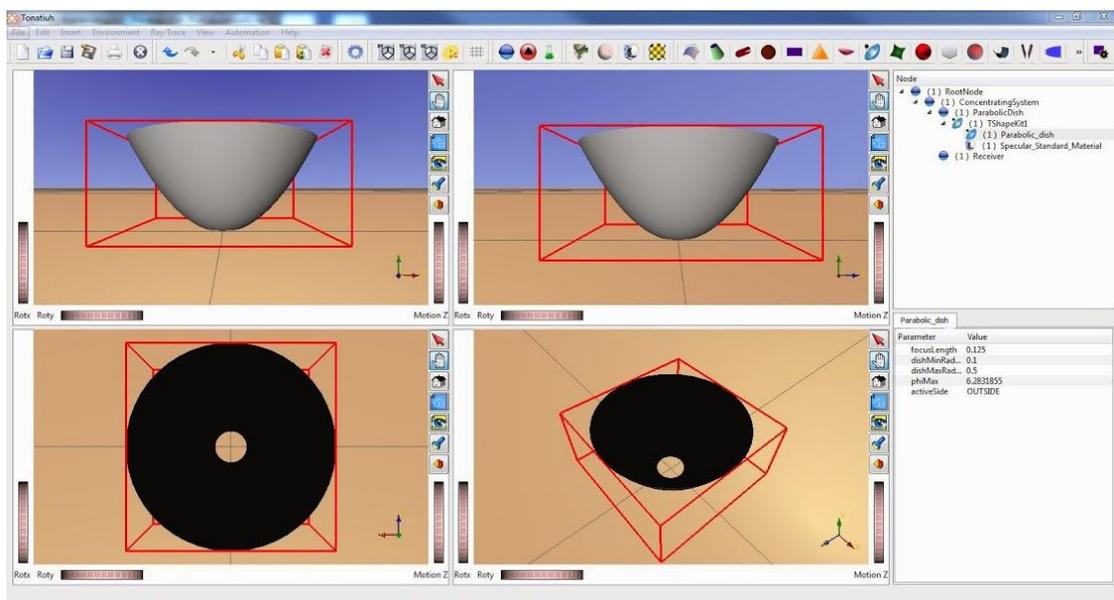


Figure IV.2 : Création de la parabole.

Comme le montre l'interface graphique de Tonatiuh, nous avons réussi à créer une parabole. Cependant, la parabole que nous avons créée n'est pas la parabole que nous voulions modéliser. La raison pour cela est que nous n'avons pas changé les valeurs par défaut.

De toute évidence, nous devons changer les valeurs attribuées à certaines des variables pour modéliser la parabole que nous sommes intéressés par les changements dont nous avons besoin pour mener à bien sont les suivants.:

Changer la longueur focale "focusLength" à 4.5 mètres.

Changer le rayon minimum "dishMinRadius" à 0. mètres.

Changer le rayon maximum "dishMaxRadius" à 4.25 mètres.

Changer le côté actif à des fins de représentation "activeSide" à "INSIDE".

Après avoir fait cela, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:

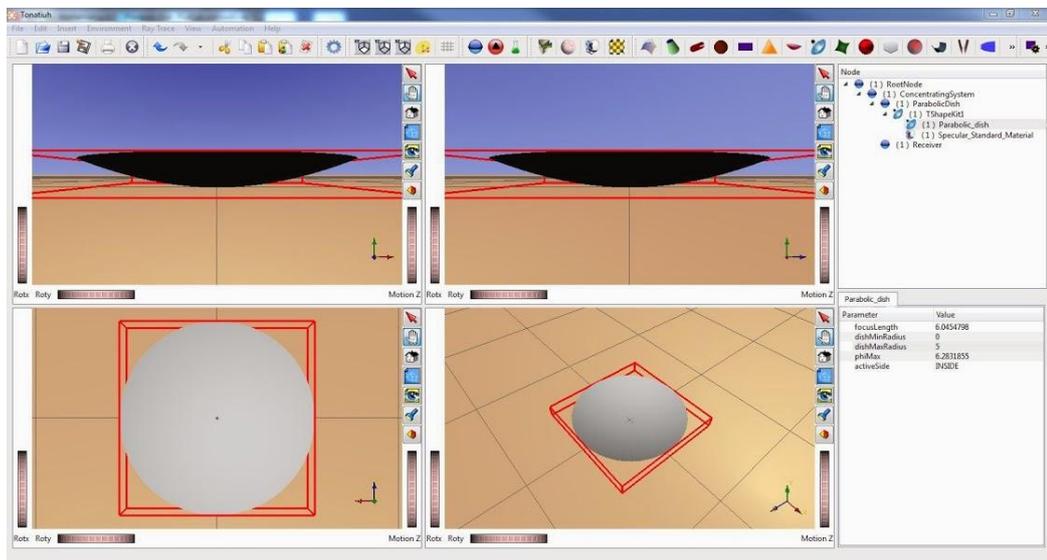


Figure IV.3 : La parabole.

Bien, nous avons modélisé la géométrie de la parabole, il nous reste à modéliser ses propriétés physiques. Pour ce faire, nous sélectionnons le nœud "Specular\_Standard\_Material" et changer les valeurs des variables suivantes de leurs valeurs par défaut à ceux qui suivent:

$$m\_reflectivity = 0.94$$

$$m\_sigmaSlope = 0$$

En réglant le pouvoir de réflexion, nous disons Tonatiuh que le miroir doit être modélisé sous la forme d'un miroir réfléchissant avec un Réflectivité de 94%.

➤ **Modélisation du récepteur :**

Cliquez sur le Groupe de nœud "Receiver" pour le sélectionner.

Ajouter un nœud de surface et de garder l'étiquette automatique "TShapeKit1" fournies par Tonatiuh.

Cliquez sur "TShapeKit1" vient d'être créé et y ajouter:

Un nœud "Flat\_Disk".

Un nœud "Specular\_Standard\_Material".

Sélectionnez le nœud "Flat\_Disk" et changer le «rayon» de 0,5 mètres (par défaut) à 0,06 mètres, et le "activeSide" de "FRONT" à "BACK".

Après avoir fait cela, si vous sélectionnez dans le menu "Affichage" l'option "Edit Mode" et mettre en place les quatre fenêtres de la vue 3D du volet de manière appropriée, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:

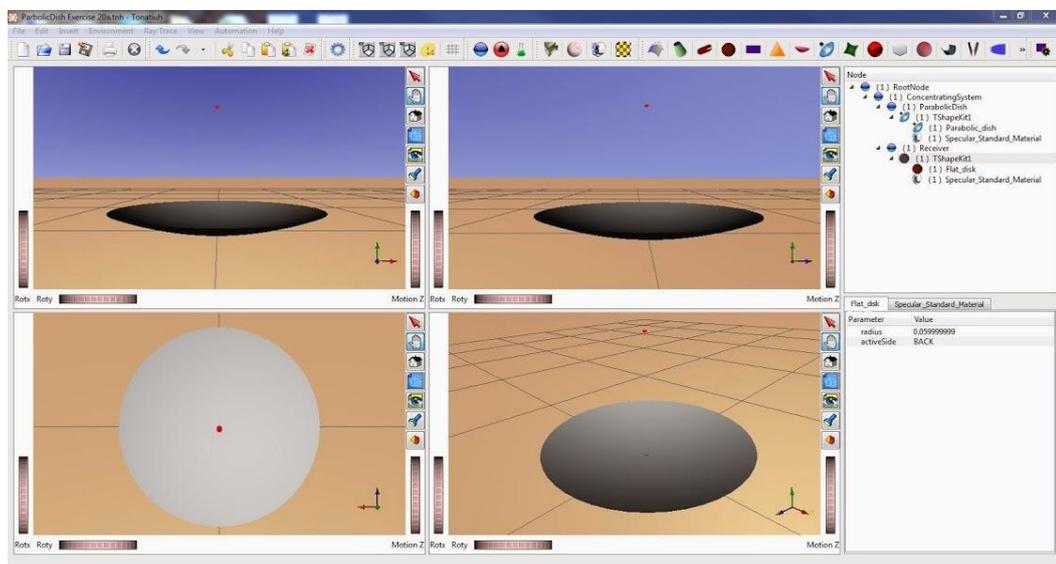


Figure IV.4 : Les quatre fenêtres de la vue 3D de Tonatiuh affichent la parabole et le récepteur.

### ➤ Modélisation du rayonnement solaire direct

De la barre de menu de Tonatiuh sélectionner "Environnement> Sun Light> Définir SunLight" afin de rendre le programme pour afficher la boîte de dialogue "Définir SunLight". Dans l'onglet "Sun Shape" de ce dialogue, sélectionnez "Pillbox\_Sunshape" comme le "Sunshape Type".

(Pour notre exemple l'irradiation solaire est de 1000 W / m<sup>2</sup>)

Cliquez sur "OK".

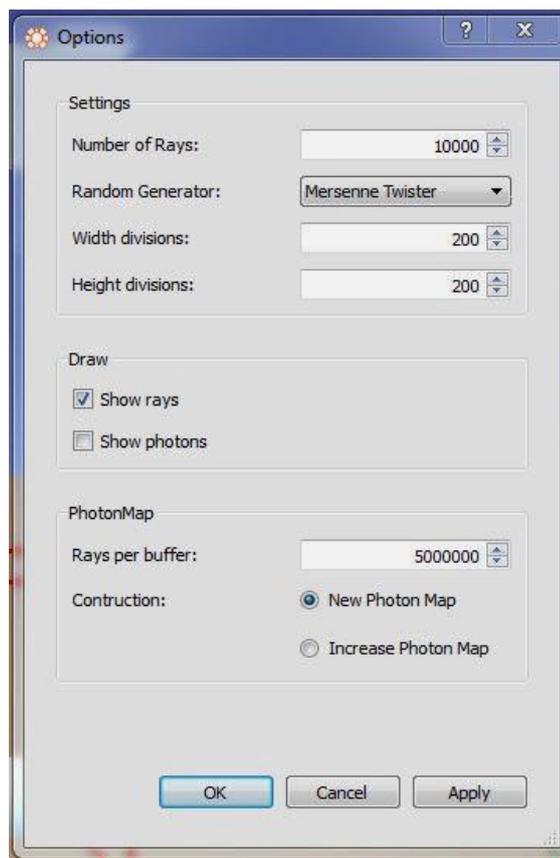
On n'a pas besoin de changer l'azimut et l'élévation du vecteur de soleil, parce que par défaut l'azimut est considéré comme 0 degrés et l'élévation de 90 degrés, qui est, le soleil vecteur,

par défaut, est définie dans la direction y vers le haut et par conséquent, aligné avec l'axe optique du miroir parabolique nous venons modéliser.

#### **IV.1.B- Traçage de rayonnement avec Tonatiuh :**

Une fois que nous avons modélisé le système de concentration solaire et le rayonnement solaire direct entrant, nous sommes prêts à exécuter Tonatiuh pour rayons de trace des rayons du Soleil dans le système de concentration et de recueillir des rayons tracés du ray pour le post-traitement à l'extérieur Tonatiuh.

Pour spécifier le nombre de rayons, nous voulons générer, et d'autres options de tracé de rayons nous allons à la barre de menu principal et sélectionnez "Ray Trace> Options Ray Trace" afin de rendre le programme pour afficher le pop-up boîte de dialogue "Options Ray Trace", représenté sur la figure ci-dessous.



*Figure IV.5 : Fenêtre de « Options Ray Trace ».*

Dans ce dialogue, nous modifions simplement le nombre de rayons à tracer par Tonatiuh de la valeur par défaut de 10000 à 1000 de rayons, et cliquez sur le bouton "OK".

Une fois cela fait, nous courons le traceur de rayons en sélectionnant dans le menu principal l'option "Ray trace> run". Cela déclenchera l'affichage par Tonatiuh du dialogue "Photon Map Settings Export".

Dans ce dialogue, changer les valeurs des options suivantes à partir de leurs valeurs par défaut à ceux indiqués ci-dessous:

Type de magasin = Binary\_file

Nom du répertoire = Le répertoire dans lequel vous voulez stocker les résultats

Nom du fichier = Receiver

Sélectionnez photons pour stocker = surfaces à l'exportation

Sélectionnez les informations de photons pour stocker:

Coordonnées

Coordonnées locales

Identificateur de surface = Non (désélectionné)

Étant donné que nous avons sélectionné "surfaces à l'exportation" comme l'option "Select photons pour stocker" nous avons besoin de spécifier les surfaces qui nous intéressent. Dans notre cas, nous sommes juste intéressés à exporter l'incident de photons sur le récepteur de disque plat. Ainsi, nous avons besoin d'ajouter que la surface à la liste des "surfaces à l'exportation". Nous faisons cela en cliquant sur le bouton "Ajouter" et en sélectionnant la surface appropriée dans le "Select Dialog de surface" qui apparaîtra. En fait, ce que nous devons sélectionner est le noeud "TShapeKit1" qui est le parent de la surface "Flat\_disk".

Une fois que nous avons fini de sélectionner et d'entrer les valeurs appropriées dans la boîte de dialogue "Photon Map Settings Export", le contenu de ce dialogue doit ressembler à la figure ci-dessous:

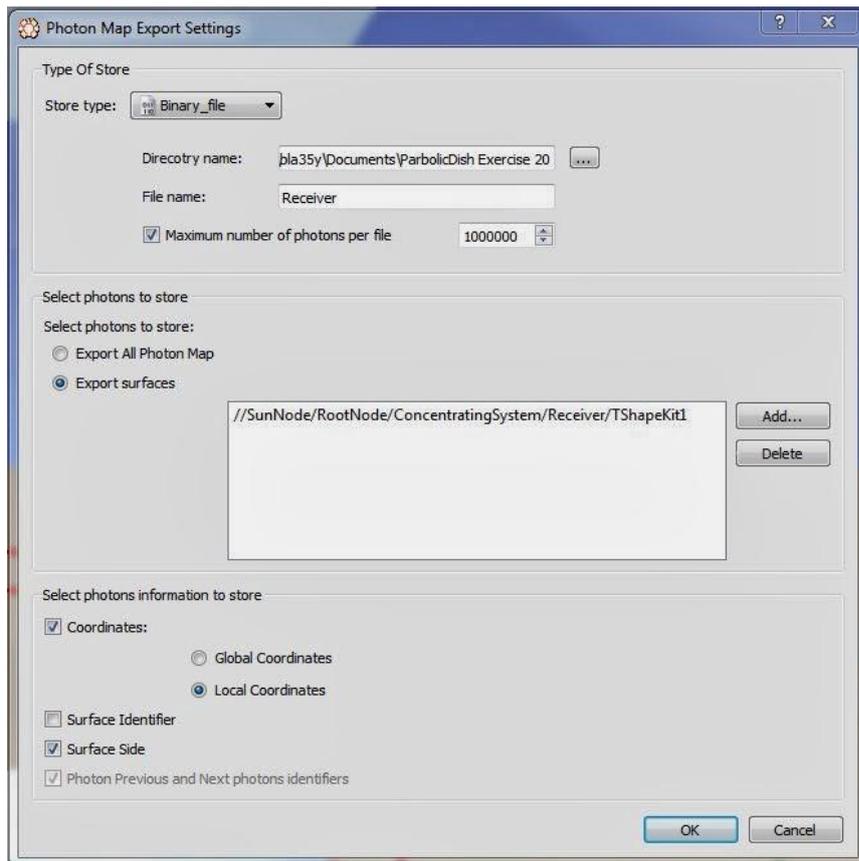


Figure IV.6: Photon Map Settings Export.

Maintenant, pour exécuter le programme, nous avons juste besoin de cliquer sur le bouton "OK" de la boîte de dialogue "Photon Map Settings Export".

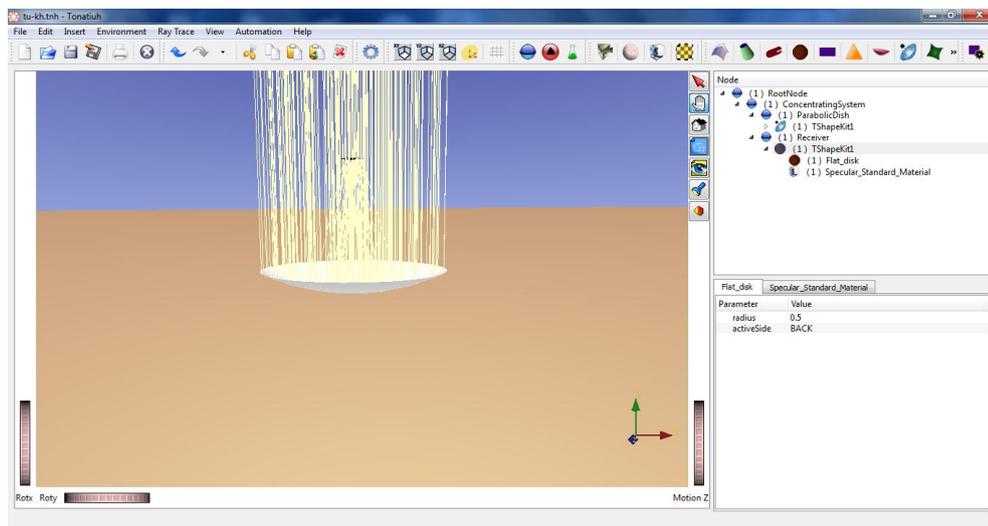


Figure IV.7: Traçage du rayonnement solaire réfléchi et concentré.

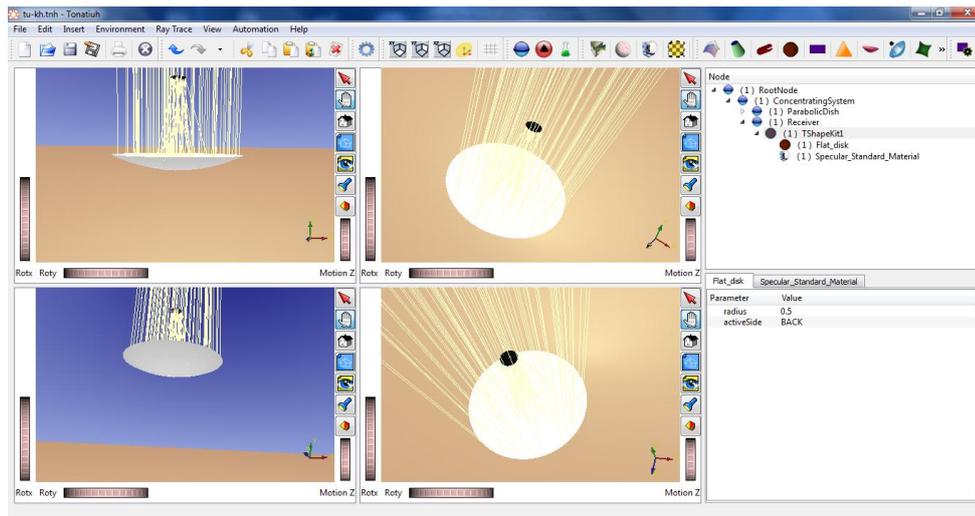


Figure IV.8: Le mode de 4 fenêtres affiche le traçage du rayonnement solaire.

## IV.2- Les calculs :

Après avoir vu le comportement optique du rayonnement solaire réfléchi et concentré sur le récepteur, on peut calculer des paramètres tels que la puissance, la quantité de chaleur, le travail et le rendement.

### IV.2.A- Le concentrateur solaire :

Les caractéristiques du concentrateur (réflecteur parabolique ou "parabole") sont :

- Diamètre : 8,5 m
- Surface projetée (collectrice), 56,7 m<sup>2</sup>
- Distance focale : 4,5 m
- Réflectivité : 94%
- On supposera que l'ensoleillement  $I$  est de 1000 W/m<sup>2</sup> "ensoleillement standard optimal".

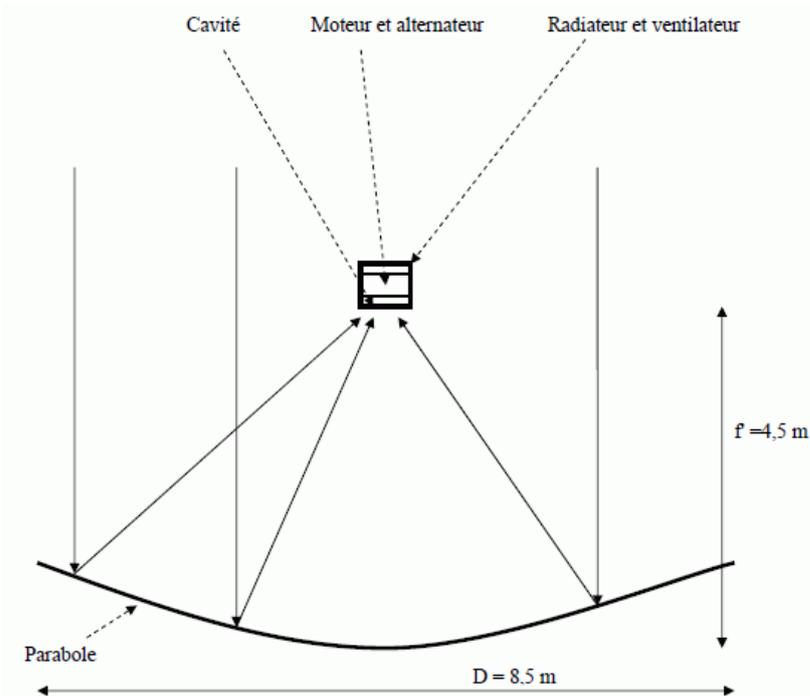


Figure IV.9 : Schéma d'un système parabole/Stirling et ses composants :

➤ **La puissance du rayonnement solaire reçue par la parabole :**

Puissance reçue = ensoleillement × surface collectrice

$$P_{\text{reçue}} = I \times S$$

$$P_{\text{reçue}} = 1000 \times 56,7 = 5,67 \cdot 10^4 \text{ W}$$

➤ **La puissance transmise au capteur :**

94% de la puissance reçue est réfléchi vers le capteur :

$$P_{\text{transmise}} = P_{\text{reçue}} \times \text{Réflectivité}$$

$$P_{\text{transmise}} = 5,67 \cdot 10^4 \times 0,94 = 5,33 \cdot 10^4 \text{ W}$$

### IV.2.B- Le moteur Stirling :

Cette machine thermique utilise un gaz qui reçoit de la chaleur d'une source chaude (la cavité) et qui fournit de la chaleur à une source froide (le radiateur à refroidissement à eau) et du travail à l'alternateur.

La cavité assure le transfert thermique vers le gaz de l'énergie de rayonnement solaire qu'elle reçoit.

Les caractéristiques du moteur Stirling sont :

- Gaz utilisé : dihydrogène.
- Pression de fonctionnement : 20-150 bar
- Température de fonctionnement : 650 °C
- Pour un éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup>, l'alternateur triphasé 400V-50Hz fournit une puissance électrique utile de 9,8 kW.

Dans ces conditions d'éclairage (1000 W/m<sup>2</sup>), la puissance du rayonnement solaire reçue est de 53 kW.

➤ **Calcule de rendement  $\eta_T$  du dispositif :**

$\eta_T = \text{puissance électrique utile} / \text{puissance reçue}$

$$\eta_T = 9,8 / 53$$

$$\eta_T = 0,185 \text{ (}\sim 18\% \text{)}$$

➤ **Estimation de rendement  $h_s$  du moteur Stirling :**

En supposant que le rendement de l'alternateur  $\eta_A$  est de l'ordre de 92%

$$\eta_T = \eta_A \times h_s$$

$$h_s = \eta_T / \eta_A = 0,185 / 0,92$$

$$h_s = 0,20 \text{ (20\%)}$$

➤ **Quelle puissance le gaz cède-t-il à la source froide ?**

Cette machine thermique utilise un gaz qui reçoit de la chaleur d'une source chaude et qui fournit de la chaleur à une source froide et du travail à l'alternateur.

La puissance fournie au gaz par la source chaude est de 53 kW.

La puissance mécanique fournie à l'alternateur est de 10,5 kW.

$$\text{Puissance cédée à la source froide} = 53 - 10,5 = 42,5 \text{ kW}$$

➤ **Calcule la durée d'un cycle :**

Sachant qu'un tour du moteur correspond à un cycle thermodynamique.

Et la vitesse de rotation du moteur est de 1500 tours par minute.

$$1500/60 = 25 \text{ tours (cycles) par seconde}$$

$$\text{Durée d'un cycle} : 1/25 = 0,040 \text{ s} = 40 \text{ ms}$$

➤ **Calcul de travail W fourni par le moteur Stirling pour un cycle :**

Travail = puissance × durée

$$W = 10,5 \times 0,040 = 0,42 \text{ kJ} = 420 \text{ J}$$

❖ **Etude du cycle théorique de Stirling :**

On se propose dans cette partie de calculer le rendement théorique d'un cycle de Stirling. On rappelle que le cycle théorique du moteur Stirling est constitué de quatre transformations réversibles (dont deux sont isothermes).

Le dihydrogène est considéré comme un gaz parfait.

Sur le diagramme de (P-V) ci-dessous, une des transformations isothermes a lieu à la température  $T_m = 70 \text{ °C}$  et l'autre à la température  $T_M = 650 \text{ °C}$ .

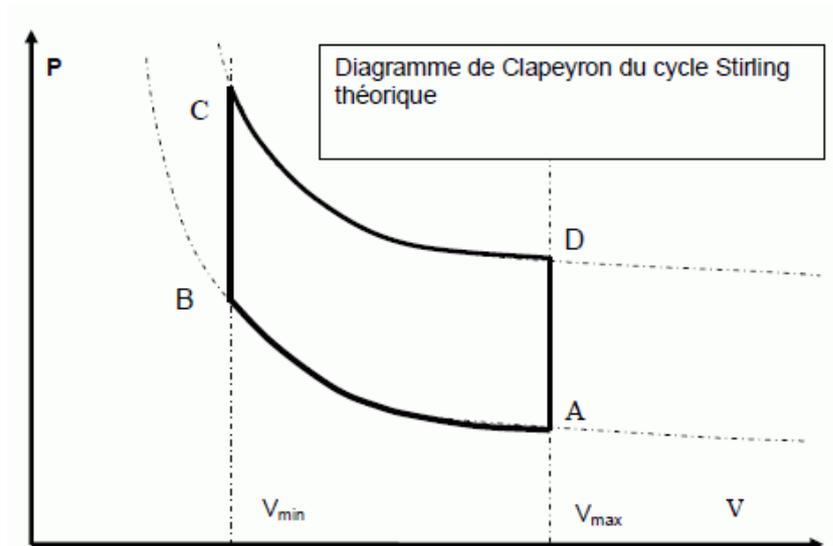


Figure IV.10 : Diagramme (P-V) du moteur Stirling.

Au point C la pression est de  $15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  et la température de  $650 \text{ °C}$ .

Le volume de gaz évolue entre les valeurs  $V_m = 184,5 \text{ cm}^3$  et  $V_M = 344,5 \text{ cm}^3$ .

On donne :

- Constante de gaz parfaits :  $R = 8,32 \text{ J/mol.K}$
- Travail de compression isotherme d'un gaz parfait :  $W_{1-2} = n.R.T \ln (V_1/V_2)$
- Relation  $T(\text{K}) = 273 + T(\text{°C})$ .

On a les transformations suivantes :

AB : compression isotherme où le gaz échange de la chaleur avec la source froide, température  $T_m = 70 \text{ °C}$  et reçoit du travail.

BC : compression isochore (pas de travail échangé).

CD : détente isotherme où le gaz échange de la chaleur avec la source chaude, température  $T_M = 650 \text{ °C}$  et cède du travail à l'extérieur.

DA : détente isochore (pas de travail échangé).

➤ **Calcule de nombre de moles de gaz mises en jeu :**

Loi des gaz parfaits :  $PV = nRT$  (point C)  $P_C \cdot V_C = n \cdot R \cdot T_C$

$$V_C = V_m$$

$$T_C = T_M$$

$$n = P_C \cdot V_m / (R \cdot T_M) = 15 \cdot 10^6 \times 184,5 \cdot 10^{-6} / (8,32 \times (650 + 273))$$

$$n = 0,36 \text{ mol}$$

➤ **Calcule de la pression correspondant au point D du diagramme :**

La transformation CD est isotherme :  $T_D = T_C = T_M = 273 + 650 = 923 \text{ K}$ .

$$P_D = (n \cdot R \cdot T_M) / V_M = (0,36 \times 8,32 \times 923) / 344,5 \cdot 10^{-6} = 8,025 \cdot 10^6 \sim 8,0 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

➤ **Calcule du travail  $W_{A-B}$  et le travail  $W_{C-D}$  reçus par le gaz lors des transformations AB et CD :**

$$W_{A-B} = \int_{V_M}^{V_m} -P \cdot dV = n \cdot R \cdot T_m \cdot \ln\left(\frac{V_m}{V_M}\right) = 0,36 \times 8,32 \times (70 + 273) \ln(344,5/184,5)$$

$$W_{A-B} = 641,5 \text{ J}$$

$$W_{C-D} = \int_{V_m}^{V_M} -P \cdot dV = -n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_m}{V_M}\right) = -n \cdot R \cdot T_M \cdot [\ln V]_{V_m}^{V_M} = n \cdot R \cdot T_M \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right)$$

$$W_{C-D} = (0,36 \times 8,32 \times 923) \ln(184,5/344,5)$$

$$W_{C-D} = -1726,3 \text{ J}$$

➤ **La quantité de chaleurs  $Q_{A-B}$  et  $Q_{C-D}$  reçue par le gaz durant ces mêmes transformations :**

Au cours de l'évolution isotherme d'un gaz parfait, l'énergie interne du gaz reste constante ; l'énergie interne d'un gaz parfait dépend de la température.

$$\Delta U = Q_{A-B} + W_{A-B} = 0 ; Q_{A-B} = -W_{A-B} = -641,5 \text{ J}$$

$$\Delta U = Q_{C-D} + W_{C-D} = 0 ; Q_{C-D} = - W_{C-D} = 1726,3 \text{ J}$$

➤ **Calcule de travail reçu par le gaz lors d'un cycle.**

$$W_{tot} = \sum W_i = W_{A-B} + W_{B-C} + W_{C-D} + W_{D-A} = 641,5 + 0 - 1726,3 + 0$$

$$W_{tot} = - 1085 \text{ J}$$

➤ **Définir et calculer le rendement thermodynamique théorique  $\eta_{th}$  de ce moteur :**

(Ce rendement théorique est, pour des raisons de modélisation, très supérieur au rendement réel mesuré).

On suppose que la chaleur n'est fournie au gaz que lors de la transformation CD.

$$\eta_{th} = \text{énergie utile} / \text{énergie dépensée} = |W_{tot}| / Q_{C-D} = 1085 / 1726,3$$

$$\eta_{th} = 0,63 \text{ ( 63\% )}$$

### **IV. 3- Conclusion :**

Dans ce chapitre on a utilisé un logiciel de simulation où les résultats obtenus sont sous formes des photos. Ces résultats obtenus dans ce chapitre nous a aidé ont bien comprendre le comportement des rayons solaire dans la concentration du système parabole-Stirling.

## **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.

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 et un moteur Stirling.

Nous simulons les performances d'un procédé solaire quelconque, basé sur la technologie de concentrateur à moteur Stirling.

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

## Bibliographie :

[1] Centrales Solaire

[http://www.labothonap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales\\_solaires\\_SQ070925.pdf](http://www.labothonap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf)

[2] Energy Technology Perspectives 2015 (AGENCE INTERNATIONALE DE

L'ÉNERGIE)<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2015ExecutiveSummaryFrenchversion.pdf>

[3] WIKIPEDIA, World energy resources and consumption

[http://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_resources\\_and\\_consumption](http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources_and_consumption)

[4] MINISTÈRE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA CONSERVATION ET DE LA SÉCURITÉ NUCLÉAIRE DE L'ALLEMAGNE. *Big boost for renewable energies*,

<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/40791/5466/>

[5] GRAS, Pierre. Le moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/histoire.php>

[6] URIELI, Irael. The Schmidt Analysis

<http://www.sesusa.org/DrIz/isothermal/Schmidt.html>

[7] BENSON, Harris. Mécanique, Saint-Laurent, Éditions du Renouveau Pédagogique, 2004, 634 p.

[8] NASA. Composite-Matrix Regenerators for Stirling Engines.

<http://www.techbriefs.com/content/view/2113/>

[9] GRAS, Pierre. Moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/comment.php>

[10] GRAS, Pierre. Moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/alpha.php>

[11] GRAS, Pierre. Moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/beta.php>

[12] GRAS, Pierre. Moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/gamma.php>

[13] CHATENET Alexis | Master MEEF 2e degré | Mémoire ESPE | 2015 “Capacité thermique massique.”

- [14] W.B Stine and R.B. Diver. A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology, Sandia National Laboratories. SAND93-7026 UC-236, 1994.
- [15] Hassan Lemrani. Modélisation énergétique des moteurs Stirling. PhD thesis, ISITEM\_ENSTIMN, Nantes, France, 1995.
- [16] P. Bessemoulin et J. Oliviéri, '*Le Rayonnement Solaire et sa Composante Ultraviolette*', Physique Atmosphérique, La Météorologie, 8ème Série, N°31, Septembre 2000.
- [17] <http://www.tecsol.fr/> Programme de dimensionnement d'un chauffe-eau solaire.
- [18] Ricaud, A., *Gisement solaire et transferts énergétiques* Energies Renouvelables 2011, Université de CERGY-PONTOISE.
- [19] [http://www.systemes-solaires.com/s\\_accueil.asp](http://www.systemes-solaires.com/s_accueil.asp) : Site de la revue « Systèmes solaires » spécialisée dans le domaine des énergies renouvelables.
- [20] <http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/servlet/com.jsbsoft.jtf.core.SG> : un ensemble de ressources pédagogiques sur l'énergie solaire et ses applications dont un programme de calcul de l'ensoleillement solaire
- [21] AFEDES, Memosol, mémento d'héliotechnique, Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris, 1979.
- [22] [http://www.industrie.gouv.fr/debat\\_energie/site/pdf/rapport-besson1.pdf](http://www.industrie.gouv.fr/debat_energie/site/pdf/rapport-besson1.pdf) Rapport Besson (Jean) sur l'énergie en France.
- [23] Weatherbase, Tlemcen, Algeria [archive] sur [www.weatherbase.com](http://www.weatherbase.com)
- [24] WIKIPEDIA. World energy resources and consumption  
[http://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_resources\\_and\\_consumption](http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources_and_consumption)
- [25] A. Ferrière, '*Les Centrales Solaires Thermodynamiques: L'Etat de l'Art et les Perspectives Mondiales*', Colloque de l'Institut ENSAM de Corse, Bastia, Mars 2005.
- [26] [http://www.labohtap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales\\_solaires\\_SQ070925.pdf](http://www.labohtap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf)
- [27] <http://fr.ekopedia.org>

- [28] Histoire du solaire à concentration <http://knol.google.com>
- [29] Ausra <http://www.ausra.com/history>
- [30] HERON d'Alexandrie. Pneumatica (Les Pneumatiques) –rééd. et trad. (G. Argoud, J.-Y. Guillaumin). Pu Saint-Etienne, 1997. ISBN 2862721115
- [31] A. MOUCHOT. La chaleur solaire et ses applications industrielles. Gauthier-Villars 1<sup>°</sup>ED, 1869. ISBN
- [32] D. et J-C. CLERMONTTEL. Chronologie scientifiques et économiques de la France. Publibook, 2009. 2748346823
- [33] Article encyclopédique en ligne : Denis Papin. [http://fr.wikipedia.org/wiki/denis\\_Papin](http://fr.wikipedia.org/wiki/denis_Papin)
- [34] P. A. DAGUIN. Cours de physique élémentaire. E. Privat / F. Tandou, 1863. ISBN
- [35] L.C. de BUFFON. Invention de miroirs ardent, pour brusler à une grande distance. Registres de l'Académie Royale des Sciences / CNRS-CRHST, 1747. ISBN.
- [36] A. L. LAVOISIER. Détail des expériences exécutées au moyen du grand verre ardent dans Mémoires de Lavoisier – Tome 3. CNRS-CRHST. ISBN.
- [37] T. FINKELSTEIN, A. ORGAN. Air engines. ASME Press, 2001. ISBN 0791801713.
- [38] S. CARNOT. Réflexions sur la puissance motrice du feu. Gauthier-Villard, 1824, rééd. 1878. ISBN.
- [39] <http://www.cosmovisions.com/pouillet.htm>
- [40] F. KRYZA. The Power of Light: The Epic Story of Man's Quest to Harness the Sun. Mc Graw-Hil Professional, 2003. ISBN 0071400214.
- [41] Services for Professionals in Solar Energy and Radiation (SoDa). <http://www.soda-is.com>
- [42] Fondation DESERTECH. [www.desertec.org](http://www.desertec.org)
- [43] Desertec Fondation. Clean Power from Deserts. The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security Whitebook – 4<sup>th</sup> edition. Protex Verlag / Trec, 2009. ISBN 3929116974.

- [44] [NREL CSP Workshop center - Solar Tres \[archive\]](#), le 7 mars 2007
- [45] [Site de l'Ademe](#)
- [46] A. FERRIERE, *Les centrales solaires thermodynamiques*, PROMES-CNRS, 2006
- [47] [Perspectives du solaire thermodynamique, septembre 2014, AIE](#)
- [48] C.E. ANDRAKA, *Dish Stirling development for utility-scale commercialisation*,  
Proceeding of the 14th SolarPACES International Symposium, Las Vegas, USA, Mars 2008
- [49] Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford.
- [50] K.LOVEGROVE, *Paraboloidal dish solar concentrators for multi megawatt power generation*, ISES Solar World Conference, Goteborg, Suède, 2003
- [51] Sébastien, R. *Théorie du Concentrateur Solaire et du Rayonnement Solaire sur l'île de la Réunion*p.p (6/42).
- [52] W. STINE, R. DIVER, *A compendium of solar Dish/Stirling Technology*, SAND 93-7026, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM,USA, 1994
- [53] *Introduction to WGassociates and solar Dish/Stirling Power systems*,  
WGA030601.DOC, [www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/WGA.pdf](http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/PDFs/WGA.pdf)
- [54]Stine, William B., and Raymond W. Harrigan, eds. *Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications*. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [55] C. ANDRAKA, *Solar heat-pipe modelling receiver wick modelling*, SAND98-2836C, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, USA, 1998
- [56] Mancini, Thomas, et al. "Dish-Stirling Systems: *An Overview of Development and Status*." *Journal of Solar Energy Engineering* 125 (May 2003).
- [57] Teagan, Peter W. Review: *Status of Markets for Solar Thermal Power Systems*, May 2001.<<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/pdfs/adlitt1.pdf>>.

[58] Stine, W. B., and Richard B. Diver. *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. Vol.SAND93-7026., 1994.

[59] Urieli , David Berchowitz, eds. *Stirling Cycle Engine Analysis*. First ed. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984.

## Nomenclature :

Notation	Désignation	Unité
P	Pression	Pascals (Pa)
V	Volume	m <sup>3</sup>
T	Température	Kelvin (K)
W	Travail	Joules (J)
R	Constante des gaz parfaits	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
n	Quantité de matière	moles (mol)
C <sub>v</sub>	Capacité thermique molaire à volume constant	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Q	Quantité de chaleur	J
U	Energie interne d'un système	J
V <sub>m</sub>	Volume minimal	m <sup>3</sup>
V <sub>M</sub>	Volume maximal	m <sup>3</sup>
T <sub>m</sub>	Température minimale	Kelvin (K)
T <sub>M</sub>	Température maximal	Kelvin (K)
W <sub>tot</sub>	l'énergie totale récupérée	J
W <sub>m</sub>	travail mécanique	J
Q <sub>tot</sub>	l'énergie totale fournie	J
Q <sub>tot</sub> '		J
η	Le rendement	
C <sub>p</sub>	capacité thermique massique	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
I	Rayonnement extra-terrestre	w/m <sup>2</sup>
I <sub>0</sub>	Constante solaire	w/m <sup>2</sup>
N	Numéro du jour de l'année	
δ	Déclinaison	Degrés
L	Longitude	Degrés
l	Latitude	Degrés
γ	L'azimut	Degrés
h	La hauteur du soleil	
(Ts) <sub>l</sub>	L'heure solaire au lever du Soleil	h
ω	L'angle horaire	Degrés
ω <sub>s</sub>	L'angle horaire au lever et coucher du Soleil	Degrés
TS	Temps solaire	h
TL	Temps légal (heure des montres)	h
TCF	L'heure civile du fuseau horaire	h
C	La correction sur le temps légal	
L <sub>ref</sub>	Longitude de référence	Degrés
E	L'équation du temps	
SS	durée effective d'ensoleillement ou insolation	h
SS <sub>0</sub>	durée maximale d'ensoleillement	h
σ	Taux d'ensoleillement	
S	Irradiation Solaire Directe	W.m <sup>-2</sup> .durée <sup>-1</sup>
D	Irradiation Solaire Diffuse	W.m <sup>-2</sup> .durée <sup>-1</sup>
G	Irradiation Solaire Globale	W.m <sup>-2</sup> .durée <sup>-1</sup>
S*	Eclairement Solaire Direct	W.m <sup>-2</sup>
D*	Eclairement Solaire Diffus	W.m <sup>-2</sup>

$G^*$	Eclairement Solaire Global	$W.m^{-2}$
$K_T$	Coefficient de transmission	
$G_0$	L'irradiation journalière sur un plan horizontal	$W.m^{-2}.durée^{-1}$
$\beta$	Est le coefficient de trouble atmosphérique	
$P_v$	La pression partielle de vapeur d'eau	mmHg
$\rho$	L'albedo	
$f$	Longueur focale	m
$R$	Rayon	m
$D$	Diamètre	m
$P_{reçue}$	Puissance reçue	W
$S$	Surface	$m^2$
$P_{transmise}$	puissance transmise	W
$\eta_A$	rendement de l'alternateur	
$V_m$	Pression	Pascals (Pa)
$V_M$	Pression	Pascals (Pa)
$T_M$	Température	Kelvin (K)
$T_m$	Température	Kelvin (K)
$\eta_{th}$	Rendement thermodynamique théorique	

## Liste des figures :

Figure 1 : Réduction cumulée des émissions de CO <sub>2</sub> par secteur et par technologie dans le scénario 2DS pour 2050.....	(6)
Figure I.1 : Schéma de la machine de Stirling.....	(10)
Figure I.2 : Robert Stirling (25 octobre 1790 - 6 juin 1878).....	(12)
Figure I.3 : Schéma de la 1 <sup>er</sup> phase (chauffage isochore).....	(14)
Figure I.4 : Schéma de la 2 <sup>em</sup> phase (détente isotherme).....	(14)
Figure I.5 : Schéma de la 3 <sup>em</sup> phase (refroidissement isochore).....	(14)
Figure I.6 : Schéma de la 4 <sup>em</sup> phase (compression isothermique).....	(15)
Figure I.7 : Schéma de déplaceur en Chauffage isochore.....	(15)
Figure I.8 : Schéma de déplaceur en Détente isotherme.....	(16)
Figure I.9 : Schéma de déplaceur en Refroidissement isochore.....	(16)
Figure I.10 : Schéma de déplaceur en Compression isotherme.....	(16)
Figure I.11 : principe de fonctionnement d'un moteur Stirling.....	(17)
Figure I.12 : Diagramme P, V du moteur Stirling.....	(17)
Figure I.13 : Diagramme P, V du moteur Stirling.....	(18)
Figure I.14 : Schéma d'un moteur stirling type Alpha.....	(21)
Figure I.15 : Schéma d'un moteur stirling type Bêta. ....	(22)
Figure I.16 : Schéma d'un moteur stirling type gamma.....	(22)
Figure II.1 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	(30)
Figure II.2 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L.....	(31)
Figure II.3 : Repérage de la position du Soleil.....	(31)
Figure II.4 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....	(33)
Figure II.5 : Irradiation globale moyenne .....	(38)
Figure II.6 : Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-parturbée.....	(40)
Figure II.7 : Irradiation directe journalière en Algérie (Juillet).....	(41)
Figure III.1: irradiation solaire moyenne.....	(44)
Figure III.2 : Illustration de la légende de la destruction de la flotte romaine à Syracus pas Archimède.....	(45)
Figure III.3 : L'éolypile décrite par Héron.....	(46)
Figure III.4 : La fontaine solaire de Salomon de Caus (1615).....	(47)
Figure III.5 : La pompe à feu de Savery 1698.....	(47)

Figure III.6 : Glace plane orientable du miroir de Buffon.....	(48)
Figure III.7 : Le four solaire de Lavoisier.....	(48)
Figure III.8 : quelques moteurs de Stirling anciens.....	(49)
Figure III.9 : L'imprimerie Solaire d'Augustin Mouchot au jardin des Tuileries en 1880.....	(50)
Figure III.10 : La machine solaire de John Ericsson décrite.....	(51)
Figure III.11 : Photographie du premier <b>dish-Stirling</b> réalisé par Ericsson.....	(51)
Figure III.12 : Les trois familles de centrales solaires thermodynamiques.....	(54)
Figure III.13: Concentrateur parabolique avec moteur Stirling.....	(55)
Figure III.14 : Schéma du concentrateur parabolique à moteur Stirling.....	(56)
Figure III.15 : Le système Parabole/Stirling.....	(57)
Figure III.16: The big dish de 400 m <sup>2</sup> de l'Australian National University à Canberra.....	(58)
Figure III.17 : Visualisation du miroir.....	(58)
Figure III.18 : <i>Les différents types de concentrateurs paraboliques</i> .....	(60)
Figure III.19 : Les deux types de monture pour le suivi du soleil.....	(61)
Figure III.20 : Absorbeur solaire du système EURODISH à Odeillo.....	(62)
Figure III.21 : Cascade d'énergie pour le système SBP à 1000 [W / m <sup>2</sup> ].....	(63)
Figure III.22 : Système de refroidissement pour la technologie parabolique Stirling.....	(65)
Figure IV.1 : capture écran de la facette de Tonatiuh.....	(72)
Figure IV.2 : Création de la parabole.....	(73)
Figure IV.3 : La parabole.....	(74)
Figure IV.4 : Les quatre fenêtres de la vue 3D de Tonatiuh affichent la parabole et le récepteur.....	(75)
Figure IV.5 : Fenêtre de « Options Ray Trace ».....	(76)
Figure IV.6: Photon Map Settings Export.....	(78)
Figure IV.7: Traçage du rayonnement solaire réfléchi et concentré.....	(78)
Figure IV.8: Le mode de 4 fenêtres affiche le traçage du rayonnement solaire.....	(79)
Figure IV.9 : Schéma d'un système parabole/Stirling et ses composants.....	(80)
Figure IV.10 : Diagramme (P-V) du moteur Stirling.....	(82)

## Liste des Tableaux :

Tableau II.1 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....(37)

Tableau II.2 : Ensoleillement du territoire algérien.....(44)