

**UNIVERSITE KASDI MARBAH OURGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUES**



Mémoire De Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de master académique

Domaine: Science et Technologie

Filière: Génie Mécaniques

Option: Génie Energétique

Réalisé par: **BOUBLALE SALAH EDDINE**

RAMDANI ZAKARIA

THEME

**Etude de la performance du cycle
inverse de moteur Stirling pour la
production du froid par l'énergie
solaire**

Soutenu publiquement

Le : 31 /05 /2017

Devant le jury :

Mme. D. DAMEN

Mr .H. BELLAHIA

Mr .N. CHERRAD

M.A.A

M.A.A

M.A.A

Président

Examineur

Encadreur

Ouargla

Ouargla

Ouargla

Année Universitaire : 2016 / 2017

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah tout puissant qui nous a offert le Courage, la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail.

Tous Nos remerciements à notre encadreur Monsieur “ Cherrad Noureddine ” de sa collaboration et de sa patience avec nous.

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux jurys qui ont accepté de juger notre travail.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, merci pour toutes nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

المخلص

أصبحت الحاجة للطاقة المتجددة وخاصة لإنتاج البرودة ملحة للغاية. التبريد بواسطة محرك ستيرلينغ هو واحد من النظم المقترحة. ولكن أداءها أقل منافسة ولا يقارن في بعض الأحيان مع أنظمة التبريد التقليدية. والهدف من هذا العمل هو دراسة كفاءة هذا النظام لتحديد المعايير الممكنة لقيام هذا النظام لإنتاج البرودة أكثر قابلية للتطبيق ومنافس للأنظمة التقليدية. وأظهرت النتائج أن الكفاءة منخفضة مقارنة مع الأنظمة التقليدية، ولكن بالمقارنة مع الأنظمة الشمسية الأخرى المنافسة كفاءة إنتاج البرودة باستعمال محرك ستيرلينغ تعتبر متوسطة ضمن مجال من 0.15 إلى 0.30. المعايير المحددة لتحسين أداء هذا النظام تتركز أساسا على ثلاث خصائص، وهي حجم الاسطوانة، وطبيعة السائل داخل المحرك وسرعة دوران المحرك.

Résumé

La nécessité du recours aux énergies renouvelables, notamment pour la production du froid est devenue très urgente. Le refroidissement par le moteur de Stirling est l'un des systèmes proposés. Mais sa performance reste moins concurrente et parfois incomparable à celle de systèmes de production de froid conventionnels. L'objectif du présent travail est d'étudier la performance de ce système pour déterminer les critères éventuels à faire ce système de production du froid plus applicable et concurrent aux systèmes classiques. Les résultats ont montré que la performance est faible par rapport aux systèmes conventionnels, mais en comparaison avec les autres systèmes solaires concurrents la performance de production du froid par moteur Stirling est dans l'intervalle moyen qui de 0.15 à 0.3. Les critères sélectionnés pour améliorer cette performance sont basés sur trois caractéristiques, à savoir: volume du cylindre, nature du fluide de travail et la vitesse de rotation du moteur.

Abstract:

The need for renewable energy, especially for the production of refrigeration, has become very urgent. Cooling by the Stirling engine is one of the proposed systems. But its performance remains less concurrent and sometimes incomparable than that of conventional refrigeration systems. The objective of this work is to study the performance of this system to determine the possible criteria to make this system of production of refrigeration more applicable and competing with conventional systems. The results showed that performance is low compared to conventional systems, but in comparison with other competitive solar systems the performance of cold production by Stirling engine is in the average range which from 0.15 to 0.3. The criteria selected to improve this performance are based on three characteristics, namely cylinder volume, the nature of the working fluid and the speed of rotation of the engine.

Liste des symboles

Symboles	Désignation	Unités
A_s	La surface du concentrateur	$[m^2]$
$C_{p\text{ air}}$	chaleur spécifique de l'air à pression constante	$[J/kg.K]$
$C_{p\text{ eau}}$	chaleur spécifique de l'eau à pression constante	$[J/kg.K]$
COP	Coefficient de performance	$[\%]$
$Cop_{\text{ sys}}$	Coefficient de performance de système	$[\%]$
C_v	la chaleur spécifique de l'air à volume constant	$[J/kg.K]$
I_p	irradiation directe des rayons du soleil	$[W/m^2]$
$L_{\text{ glace}}$	Chaleur latente de glace	$[J/kg]$
M	Masse du gaz	$[kg]$
N	Nombre de mol de gaz	$[mol]$
Q_a	Quantité de chaleur rejetée	$[Joule]$
Q_c	Quantité de chaleur fournir	$[Joule]$
Q_f	Quantité de chaleur extrait	$[Joule]$
Q_r	Quantité de chaleur de refroidissement	$[Joule]$
Q_R	La chaleur rejetée vers le milieu ambiant	$[Joule]$

Q_s	Quantité de chaleur reçoit dance la source solier	[Joule]
R	Constance de gaz parfait	[J/kg.K]
T_a	Température ambiant	[K]
T_c	Température de source chaud	[K]
T_f	Température de froid	[K]
T_{max}	La température maximale de cycle Stirling	[K]
T_{min}	La température minimale de cycle Stirling	[k]
V_{max}	Volume maximal de cylindre	[m ³]
V_{min}	Volume minimal de cylindre	[m ³]
W_{comp}	Le travail fournir au cours de la compression	[Joule]
W_{det}	Le travail récupéré au cours de la détente	[Joule]
W_{tot}	Le travail total de cycle	[Joule]
η	Le rendement de cycle Stirling	[%]
η_{Carnot}	Le rendement de cycle Carnot	[%]
η_{S1}	Le rendement de cycle de 1 ^{er} moteur Stirling	[%]
η_{S2}	Le rendement de cycle de 2 ^{ème} moteur Stirling	[%]
η_{sol}	Le rendement de collecteur solaire	[%]

Liste des tableaux

N° de tableau	Designation	Page
Tableau(I.1)	principales caractéristiques des différentes technologies de procédés solaires à concentration	15
Tableau(IV.1)	Données des calculs thermodynamique	44
Tableau(IV.2)	Performance typique des systèmes de refroidissement solaire	49

Liste des figures

N° de figure	Désignation	Page
Figure (I.1)	Répartition des centrales solaires thermodynamiques à la surface du globe (NREL)	6
Figure (I.2)	Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration	7
Figure (I.3)	Schéma résumant le principe des 4 technologies de CSP	8
Figure (I.4)	principe de miroirs cylindro-paraboliques	9
Figure(I.5)	Centrale cylindro-parabolique	9
Figure (I.6)	Schéma de principe d'un linéaire Fresnel	10
Figure (I.7)	principe de centrale solaire à tour	12
Figure (I.8)	Centrale à tour solaire	12
Figure (I.9)	Schéma décrivant le système Dish-Stirling	13
Figure (I.10)	Schéma de principe d'une parabole-solaire	14
Figure (I.11)	Installations de Dish-Stirling	14
Figure (I.12)	système de réfrigération thermomécanique	16
Figure (II.1)	Moteur Stirling de Robert Stirling	20
Figure (II.2)	Identification des éléments d'un Stirling	22
Figure (II.3)	Définition détaillée des volumes	22
Figure (II.4)	Type de moteur Alpha	25
Figure (II.5)	Type de moteur Bêta	26
Figure (II.6)	Type de moteur gamma	26
Figure (II.7)	Diagramme du cycle Stirling théorique	27
Figure (II.8)	4 temps du cycle pour un moteur alpha	28
Figure (II.9)	Diagramme indicateur d'un moteur Stirling réel	28
Figure (III.1)	schéma de système solaire de production du froid par moteur Stirling	32
Figure (III.2)	Rayons réfléchis par un miroir parabolique	33
Figure (III.3)	Rayons réfléchis par un miroir sphérique	33

Figure (III.4)	Schémas représentant un récepteur externe.	34
Figure (III.5)	Schémas représentant un récepteur à cavité.	34
Figure (III.6)	Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température	36
Figure (III.7)	Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température	36
Figure (III.8)	Viscosités des fluides de travail en fonction de la température	37
Figure (III.9)	Densités des fluides de travail en fonction de la température	38
Figure(III.10)	Diagramme indicateur d'un système Stirling	39
Figure (IV.1)	rendement du premier moteur en fonction de la température chaude T_c	45
Figure (IV.2)	Travail total de moteur en fonction de température chaude T_c	46
Figure (IV.3)	Rendement du deuxième moteur en fonction de la température chaude T_c	46
Figure (IV.4)	COP de système en fonction de température chaude T_c .	47
Figure (IV.5)	Quantité de glace produite en fonction de la performance	48

Table des matières

Remerciement	
Résumé	
Liste de figure	
Liste de tableau	
Liste des symboles	
Sommaire	
Introduction générale.....	2

Chapitre I: Système solaire thermique à concentration (CSP)

1 Introduction.....	5
2 Le solaire thermique à concentration CSP (Concentrating Solar Power)	5
2.1. Principe de fonctionnement :	7
2.2 Type de technologies CSP :.....	8
2.3 Concentration linéaire.....	8
2.3.1 Collecteurs cylindro-paraboliques	8
2.3.1.1 Avantages.....	9
2.3.1.2 Inconvénients.....	10
2.3.2 Collecteurs Fresnel linéaires.....	10
2.3.2.1 Avantages.....	11
2.3.2.2 Inconvénients.....	11
2.4. Concentration ponctuel.....	11
2.4.1.Centrale à tour solaire.....	11
2.4.1.1 Avantages.....	12
2.4.1.1 Inconvénients.....	12
2.4.2 Collecteurs Dish Stirling paraboliques.....	13
2.4.2.1 Avantages.....	14
2.4.2.2 Inconvénients.....	15
3. Comparaisons des différentes centrales solaires à concentration	15
4. Utilisation du solaire thermique dans la production du froid	15
5.Conclusion.....	17

Chapitre II: Moteur Stirling

1. Introduction.....	19
2. Historique.....	20
2.1. Contexte.....	20
2.2. Développement au cours des années.....	20
3. Présentation d'un moteur Stirling:.....	21
4. Principe de fonctionnement.....	22
5. Types de moteur Stirling.....	25
5.1. Type Alpha (α).....	25
5.2. Type Bêta (β).....	25
5.3. Moteur de type gamma (γ).....	26
6. Cycle de moteur Stirling:.....	27
6.1. Cycle idéale du moteur Stirling.....	27
6.2. Cycle réel du moteur Stirling:.....	28
7. Utilisation de moteur Stirling dans la production de froid.....	29
8. Avantages et inconvénients.....	29
8.1. Avantages.....	29
8.2. Inconvénients.....	30
9. Conclusion.....	30

Chapitre III: Système solaire de production du froid par moteur Stirling

1. Introduction.....	32
2. Description du système.....	32
2.1. Concentrateur parabolique.....	32
2.2. Récepteur solaire.....	33
2.3. Première moteur Stirling.....	34
2.3.1. Fluides de travail du moteur Stirling.....	35
2.4. Système d'engrenage.....	38
2.5. Deuxième moteur Stirling.....	39
3. principe de fonctionnement de système.....	39
4. Cycle thermodynamique de système.....	39
5. Modélisation mathématique de système de production du froid par moteur Stirling.....	40
5.1. Première moteur Stirling.....	40
5.2. Deuxième moteur Stirling (Machine frigorifique).....	40

5.3. Travail total du cycle de moteur Stirling	40
5.4. Rendement d'un cycle de Stirling	41
5.5. Rendement de collecteur solaire parabolique	41
5.6. Coefficient de performance (COP) de système solaire pour la production de froid par moteur Stirling	41
6. Conclusion.....	42

Chapitre IV: Résultat et discussion

1. Introduction.....	44
2. Données de Calcul thermodynamique	44
3. Résultats et interprétation	45
3.1. Influence de température de source chaude sur le rendement moteur Stirling motrice.....	45
3.2. Influence de température de source chaude sur le travail total de moteur Stirling.....	45
3.2. Influence de température de source chaude sur le rendement de deuxième moteur Stirling	46
3.3. Influence de température de source chaude sur le coefficient de performance de système	47
3.4. Quantité de glace produite en fonction de la performance de système	47
3.5. Comparaison de système solaire de production du froid par moteur Stirling avec autres systèmes solaires.....	48
4. Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	51
Références.....	53

Introduction générale

Introduction générale

La consommation d'énergie primaire mondiale reste dominée par les énergies fossiles, avec des conséquences économiques et environnementales de plus en plus évoquées : coûts croissants liés à la hausse des prix des ressources fossiles et fissiles, niveau limité de sécurité énergétique, contribution à la pollution locale et aux changements climatiques, dont les impacts pourraient être dramatiques. Dans ce contexte, l'exploitation des énergies renouvelables est de plus en plus cruciale, et parmi ces énergies, une idée ancienne et très prometteuse est celle de la concentration du rayonnement solaire (la source renouvelable la plus abondante) pour produire de la chaleur à haut niveau de température [1].

Dans le domaine de production du froid, les combustibles fossiles sont encore les plus utilisés comme sources d'énergie. Alors que toutes les prévisions montrent que ces sources sont épuisables, en plus les problèmes environnementaux provenant principalement des émissions des gaz et des déchets polluants créent pendant l'exploitation des combustibles fossiles.

Cette situation actuelle et future a mis en évidence la nécessité du recours aux énergies renouvelables, notamment où le froid est devenu très demandé avec la grande production des aliments conservables et les médicaments, en plus que des régions bien ensoleillées toute l'année souffrent encore de manque de réseau publique de l'électricité pour au moins d'assurer le conditionnement à air pendant l'été.

Ça a poussé les recherches scientifiques pour trouver des applications de la production du froid indépendantes de l'énergie fossile, et en effet, plusieurs systèmes ont été proposés, tels que le système à absorption solaire, le système à adsorption solaire, le moteur de Stirling et autres. Mais le problème posé est que la performance de ces systèmes est moins concurrent et parfois incomparables à celle de systèmes de production de froid classique comme le système à compression de vapeur utilisant l'énergie électrique.

C'est pour ça, l'objectif du présent travail est d'étudier la performance de l'un de ces systèmes, dont notre choix est le moteur de Stirling, pour déterminer les critères éventuels à faire ce système de production du froid plus applicable et concurrent aux systèmes classiques, et par la suite quitter la dépendance aux combustibles fossiles.

Donc, la présentation de ce mémoire est résumée selon le cheminement suivant :

- Dans le premier chapitre, nous avons évoqué les systèmes solaires thermiques à concentration et le types de ce système.

- Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les moteurs Stirling.
- Dans le troisième chapitre nous avons étudié le système solaire de la production du froid par moteur Stirling.
- Le quatrième chapitre est une discussion et des résultats.

Et enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion qui englobe une interprétation générale de l'étude.

Chapitre I

Systeme solaire thermique à concentration (CSP)

Chapitre I: Système solaire thermique à concentration (CSP)

1. Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Technologiquement, deux voies sont pratiquées dans l'utilisation directe de l'énergie solaire, il s'agit du solaire thermique et le solaire photovoltaïque [4]:

- En ce qui concerne le solaire thermique, c'est un système qui utilise l'énergie solaire pour produire la chaleur en chauffant un fluide à plus ou moins haute température.
- Quant au solaire photovoltaïque, c'est un système solaire composé de cellules photovoltaïques

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 [7].

L'utilisation de l'énergie solaire dans les applications techniques est souvent limitée du fait énergie par rapport aux sources d'énergie classiques. La concentration optique est une option pour augmenter la densité d'énergie du rayonnement solaire résultant de la possibilité d'utiliser des absorbeurs avec de petites surfaces. Des températures plus élevées peuvent être atteintes dans des conditions concentrées, parce que les pertes de chaleur sont proportionnelles à l'absorbeur surface. Si l'objectif final est de transformer l'énergie solaire, la thermodynamique suggère qu'il peut être fait plus efficacement plus la température est élevée [2].

2. Le solaire thermique à concentration CSP (Concentrating Solar Power)

Le solaire thermique thermodynamique est une des technologies les plus efficaces pour valoriser cette ressource. C'est au milieu des années 1970 que le concept de centrales solaires thermodynamiques commence à éveiller l'intérêt de centres de recherche nationaux et de grands groupes industriels. Dans les années 1980, des plateformes expérimentales sont développées aux États-Unis (Albuquerque et Barstow Solar One), en Espagne (plateforme solaire d'Almería aujourd'hui utilisée par le « Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt », DLR et le « Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas », CIEMAT) et en France (centrale solaire THEMIS à Targassonne et le four d'Odeillo). À l'issue du deuxième choc pétrolier de 1979, le gouvernement des États-Unis propose des crédits d'impôts aux investisseurs sur des projets de centrales solaires, impose l'obligation de

rachat de l'électricité solaire à un tarif incitatif et le garantit à long terme. Entre 1984 et 1990, neuf centrales cylindroparaboliques commerciales sont construites en Californie par la société Luz (Solar Energy Generating System I à IX (SEGS)). Au début des années 90, ces aides diminuent en même temps que le prix des énergies fossiles chute. Dans les années qui suivent, seuls quelques pays comme les États-Unis, l'Espagne et l'Allemagne continuent à mener des recherches sur la production d'électricité par voie solaire concentrée.

En 2006, après 15 années sans nouveaux projets, l'entreprise Abengoa Solar construit la centrale Planta Solar 10 (PS10) dans la région de Sanlucar Mayor en Espagne suivie par l'entreprise Acciona Energia avec la construction de la centrale solaire Nevada Solar One aux USA (National Renewable Energy Laboratory, NREL). Dans les années qui suivent, une quantité importante de projets de construction de centrales solaires sont initiés. Aujourd'hui, on compte environ 115 centrales solaires de tous types, en arrêt, en fonctionnement ou en construction dans 15 pays. Les pays pionniers dans la discipline restent les États-Unis et l'Espagne, puisqu'ils regroupent à eux deux environ 74 % des projets de centrales solaires existantes ou en construction. La Figure 1 présente la répartition des centrales solaires thermodynamiques dans le monde [3].

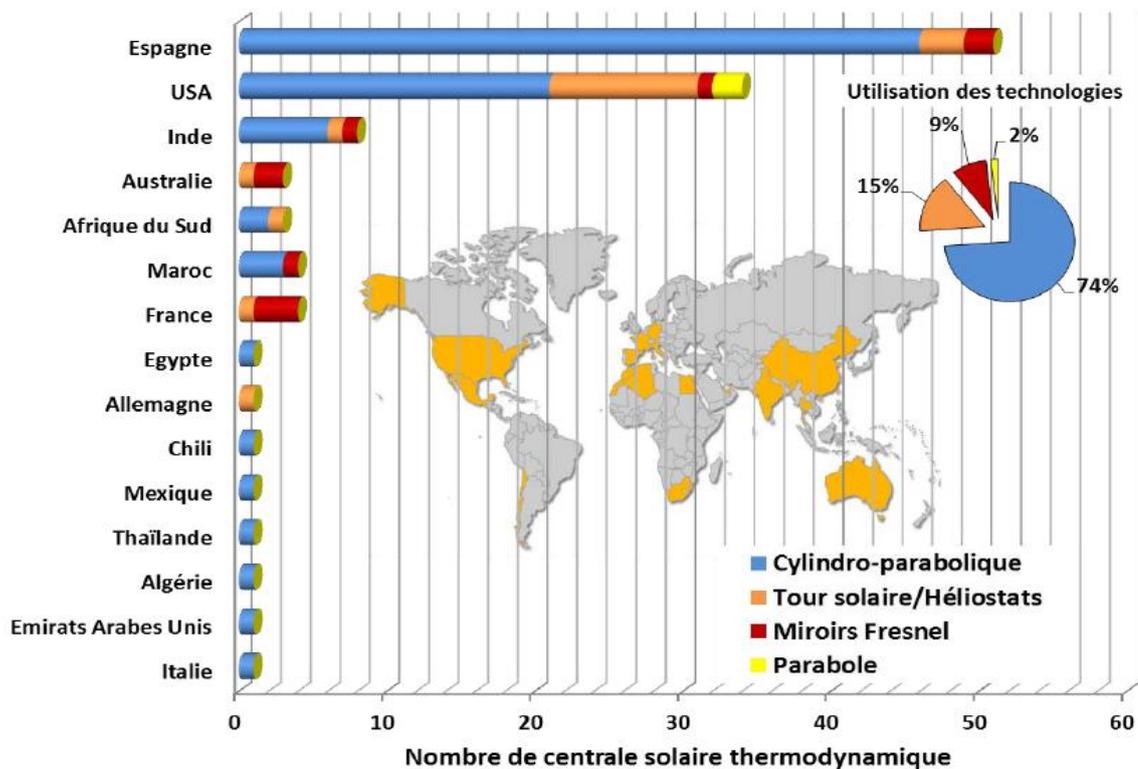


Fig. I.1: Répartition des centrales solaires thermodynamiques à la surface du globe (NREL)

[3].

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solaire thermique.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW, chacune sera lancée pendant la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire.

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030 [14].

2.1. Principe de fonctionnement

Les éléments constitutifs principaux d'une centrale solaire thermodynamique (voir figure 2) sont [8] :

- Dispositif optique de concentration du rayonnement solaire .
- Système de production de chaleur composé d'un récepteur, d'un fluide caloporteur et éventuellement d'un moyen de stockage.
- Sous système de conversion de la chaleur en travail mécanique ou électricité.

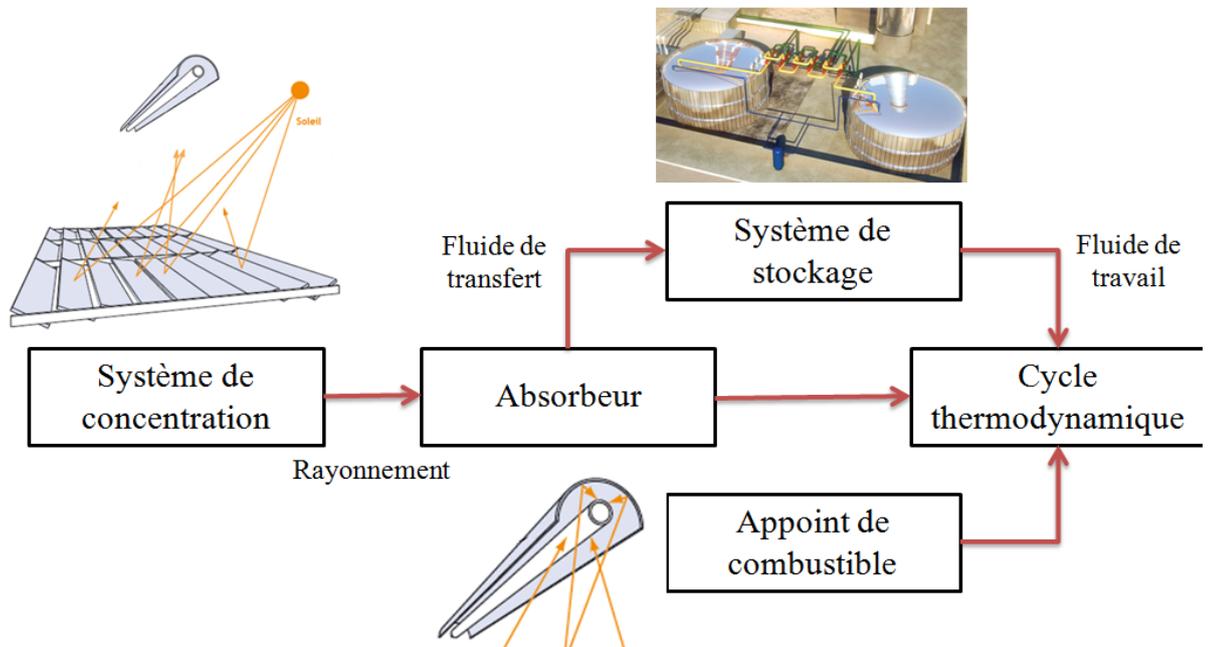


Fig. I.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration [9].

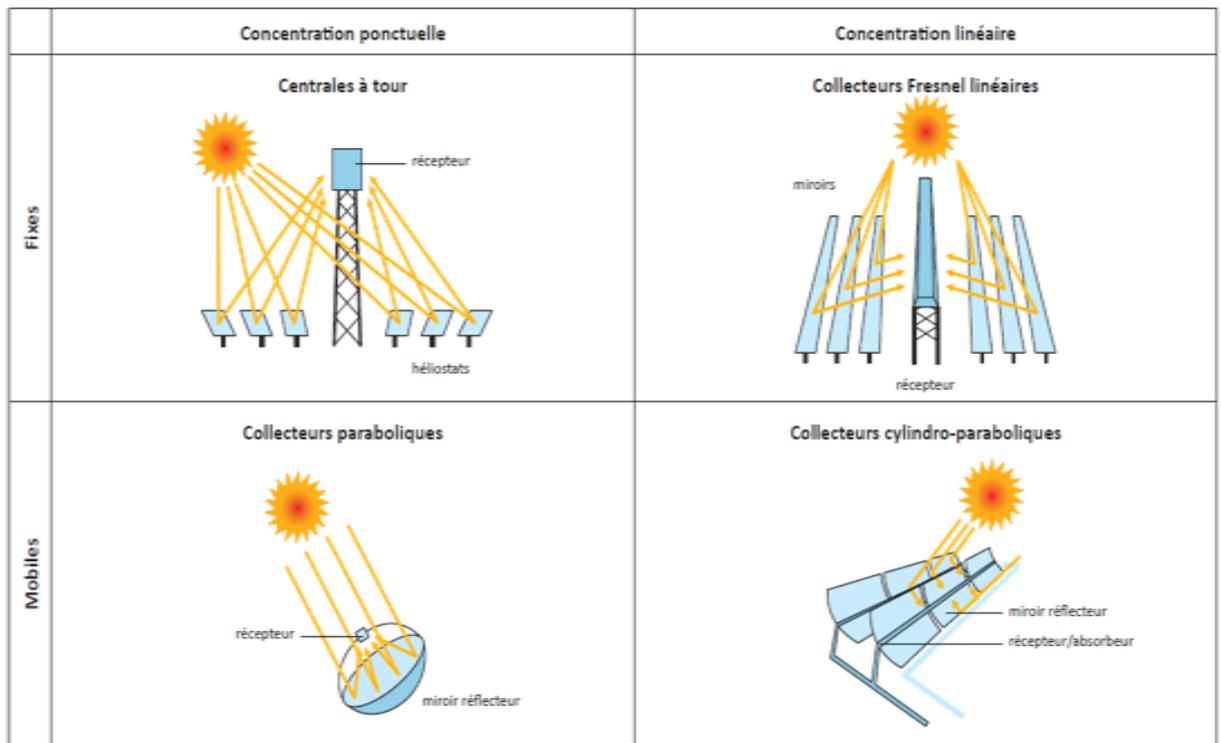
Les champs de miroir concentrent les rayons du soleil pour chauffer un récepteur à des températures élevées. Cette chaleur est transformée d'abord en énergie mécanique (par des turbines ou des moteurs) [5].

2.2. Type de technologies CSP

Les quatre principales technologies CSP peuvent être divisées en deux catégories :

- Les technologies à concentration linéaire qui concentrent les rayons du soleil sur un tube linéaire.
- Les technologies à concentration ponctuelle qui concentrent les rayons solaires sur un point.

La figure suivante montre les 4 principales technologies de concentration, les termes fixes et mobiles se rapportent au récepteur qui est, soit fixe, soit lié au miroir et donc se déplace avec lui :



source : AIE

Fig. I.3: Schéma résumant le principe des 4 technologies de CSP [5].

2.3. Concentration linéaire

2.3.1. Collecteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil.

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400 °C. Ce fluide est ensuite pompé à

travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou moteur ou générateur électrique [6].

Les collecteurs cylindro-paraboliques exploités commercialement depuis 1984 ont montré leur applicabilité à travers des échangeurs de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou moteur ou générateur électrique. Leur technologie la plus mature est démontrée à l'échelle industrielle. Elle offre des possibilités de stockage [5].

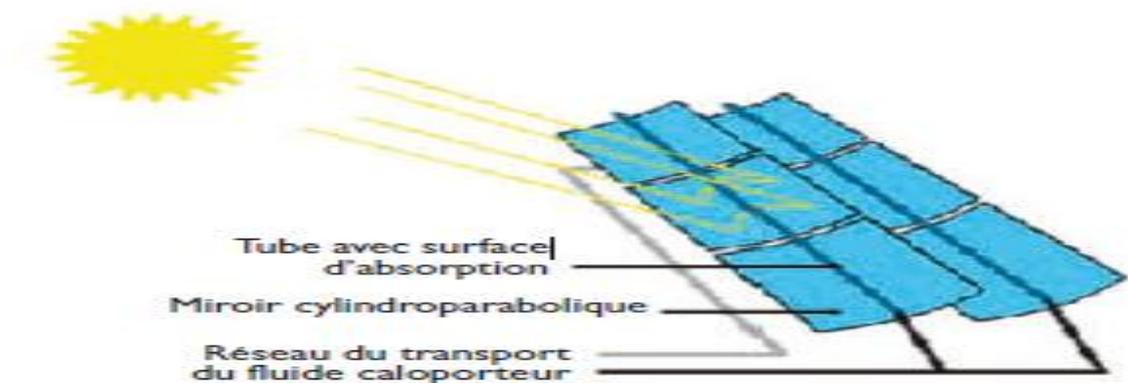


Fig. I.4 : principe de miroirs cylindro-paraboliques [1].



Fig. I.5: Centrale cylindro-parabolique [5]

2.3.1 .1. Avantages

- C'est une source gratuite et elle est inépuisable.
- Elle peut fonctionner sans interruption grâce aux nouveaux systèmes de stockage.
- Il n'y a aucune émission de produits polluants [11].

2.3.1.2. Inconvénients

- Ces centrales nécessitent d'une surface au sol très importante et un coût d'installation important pour que la centrale fonctionne à plein régime.
- Il faut souvent les placer dans des zones à très fort ensoleillement et une zone assez chaude [11].

2.3.2. Collecteurs Fresnel linéaires

Une centrale solaire à miroir Fresnel est composée d'une succession de miroirs plats capables de pivoter chacun selon un axe pour suivre la course du soleil. Elle tient son nom de la technique utilisée dans certains phares marins : la lentille de Fresnel. Une première étape de réflecteur est installée sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Une deuxième étape de réflecteurs qui joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur redirige le rayonnement vers ce dernier [5].

Contrairement à un absorbeur mobile, cette technologie limite les contraintes mécaniques et d'étanchéité en bout de ligne. Les miroirs plats ainsi que la structure métallique permettent une réduction des coûts par rapport aux réflecteurs paraboliques. La proximité au sol et la géométrie des miroirs réduisent les contraintes dues aux vents et facilite le nettoyage [9].

La figure suivante est un schéma de principe d'un linéaire Fresnel :



Fig. I.6 : Schéma de principe d'un linéaire Fresnel [9].

2.3.2.1. Avantages

- Les miroirs plans sont plus simples à fabriquer et ils ont un meilleur marché que les paraboliques et cylindro-paraboliques.
- Moins de prise au vent, infrastructure moins importante qu'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques [10].

2.3.2.2. Inconvénients

- Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques [10].

2.4. Concentration ponctuel

2.4.1. Centrale à tour solaire

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats (voir figure I.7). Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000 (le Facteur de concentration = la surface du miroir par la surface du récepteur) ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600°C à 1000 c. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à la fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines [8].

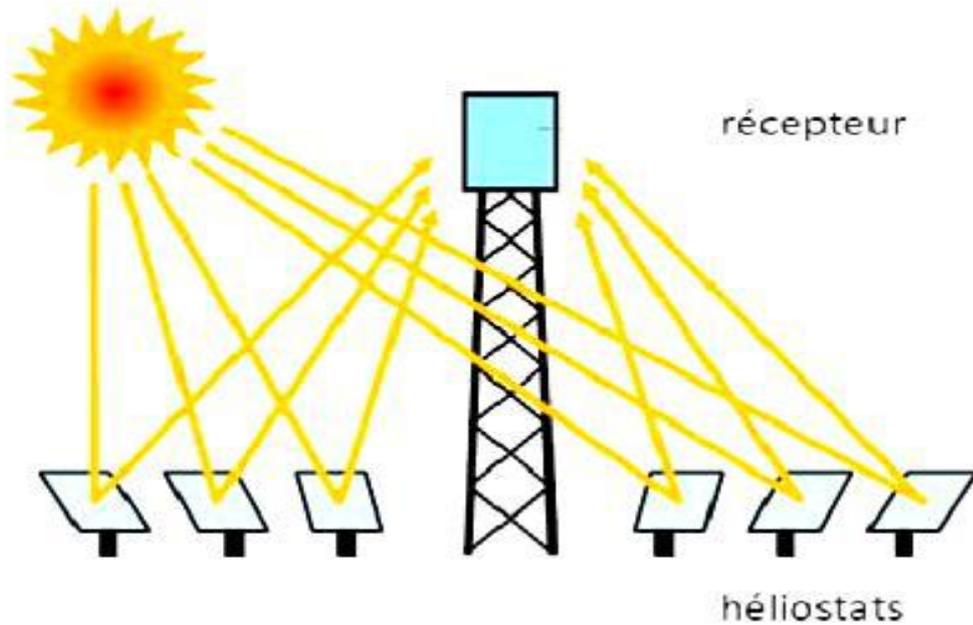


Fig. I.7 : principe de centrale solaire à tour [8].



Fig. I.8: Centrale à tour solaire [11].

2.4.1.1. Avantages

- Ces centrales sont également une source d'énergie inépuisable.
- Seule la construction est payante : elle est gratuite lorsqu'elle est construite.
- C'est une énergie non polluante.
- Elles permettent de valoriser les territoires vastes et désertiques [11].

2.4.1.2. Inconvénients

- Ces centrales ont besoin d'un espace vaste et une surface au sol importante.
- Elles requièrent un très fort ensoleillement [11].

2.4.2. Collecteurs Dish-Stirling paraboliques

Ce convertisseur est constitué de trois éléments principaux : le concentrateur solaire, le récepteur solaire placé au foyer du concentrateur et le moteur Stirling (figure I.9).

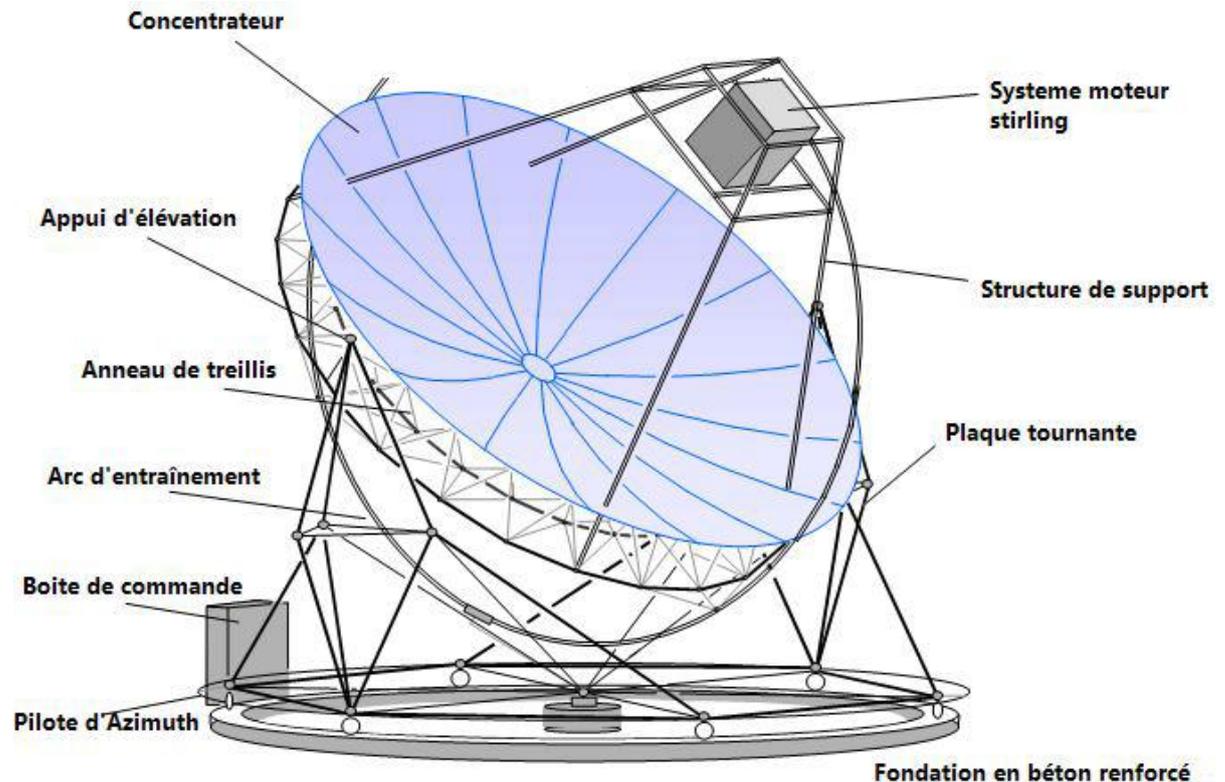


Fig. I.9: Schéma décrivant le système Dish-Stirling [5].

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome (voir figure I.9). Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C [8].

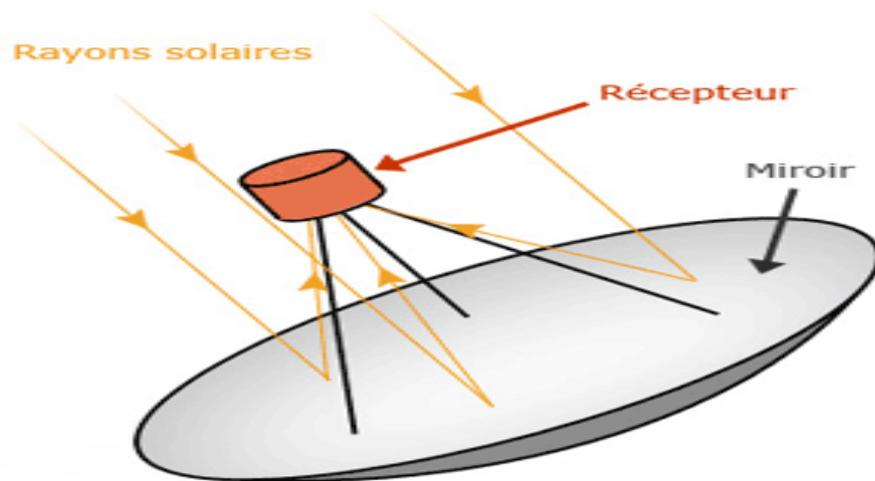


Fig. I.10 : Schéma de principe d'une parabole-solaire [11].

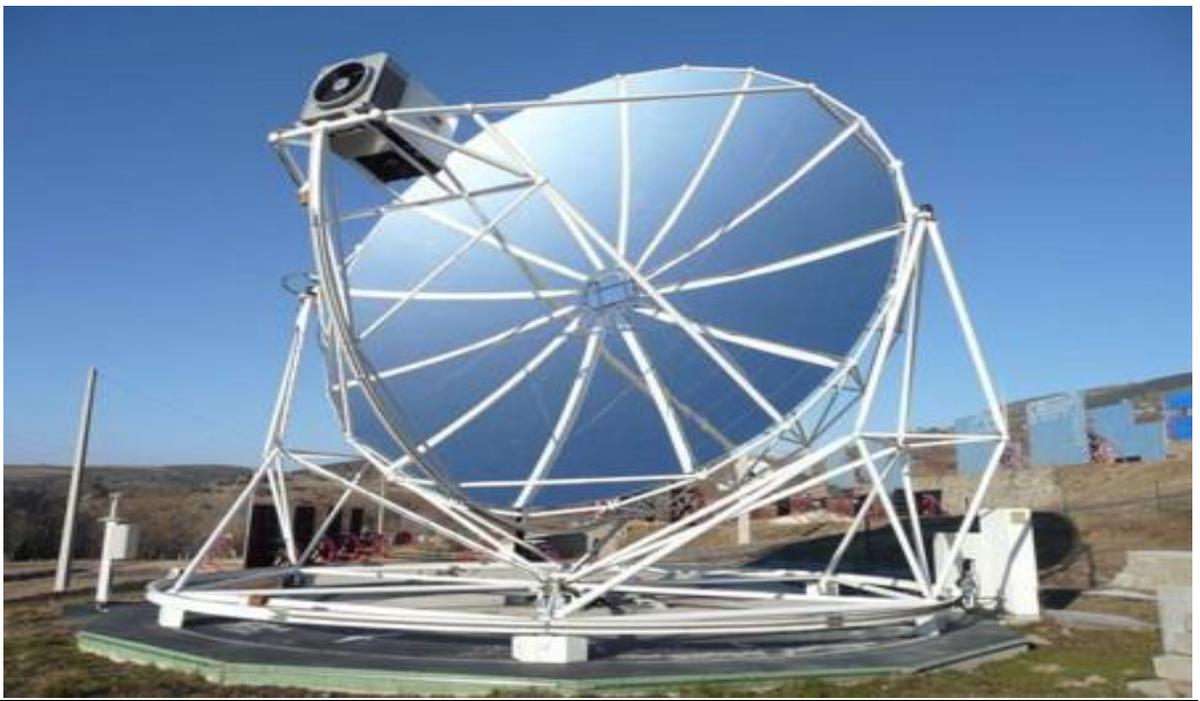


Fig. I.11 : Installations de Dish-Stirling [11].

2.4.2.1. Avantages

- C'est une source d'énergie inépuisable et gratuite comme pour la centrale vue auparavant.
- Les centrales permettent d'avoir un bon rendement et une bonne performance.
- Il n'y a pas d'émissions polluantes.
- Ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique [11,8].

2.4.2.2. Inconvénients

- Ces centrales, contrairement au cylindro-parabolique, ne fonctionnent que la journée et donc par intermittence.
- Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible [11,8].

3. Comparaisons des différentes centrales solaires à concentration

	Cylindro-parabolique	Linéaire Fresnel	Central à tour	Concentrateur parabolique
Puissance(MW)	10-200	10-200	10-150	0.01-0.4
concentration	70-80	25-100	300-1000	1000-3000
Temperature opératoire (°c)	200-500		600-1000	
Rendement cycle thermique (%)	30-40 ST	30-40 ST	30-40 ST	45-55 CC
Fluide	Huile thermique, eau/vapeur	Huile thermique, eau/vapeur	Air, sels fondus, Eau/vapeur	Hydrogen, helium, air

ST : turbine à vapeur; CC : cycle combiné; GT : turbine à gaz.

Tab. I.1 : principales caractéristiques des différentes technologies de procédés solaires à concentration [9].

4. Utilisation du solaire thermique dans la production du froid [25]

Le système de refroidissement solaire est généralement composé de trois sous-systèmes : le système de conversion de l'énergie solaire, le système de réfrigération et l'enceinte frigorifique. Le cycle approprié à chaque application dépend des exigences de la demande de refroidissement, à savoir : la puissance, les niveaux de température de l'objet réfrigérés ainsi que de l'environnement. A partir du flux de l'énergie solaire il y a évidemment deux importantes voies à suivre : Conversion thermique ou électrique par cellules photovoltaïques (PV).

Les Systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur solaire plutôt que de l'électricité solaire pour produire l'effet frigorifique. Dans ces systèmes, les capteurs solaires de type plaque

plane sont les plus communément utilisés. De même, on peut trouver dans la littérature d'autres formes de capteur tel que la forme cylindro-parabolique.

Dans un système de réfrigération solaire thermomécanique, le moteur thermique convertit la chaleur solaire à un travail mécanique qui à son tour entraîne le compresseur mécanique du réfrigérateur par compression de vapeur. Un schéma d'un tel système de refroidissement est montré sur la figure (I.12), où nous observons sur que le capteur solaire reçoit d'abord le rayonnement solaire Q_s . Cette quantité d'énergie est donnée par la multiplication de la surface, exposée au rayonnement, par le rayonnement solaire perpendiculaire à la surface I_p :

$$\eta_{\text{sol-heat}} = \frac{Q_c}{I_p \times A_s} = \frac{Q_c}{Q_s} \quad (\text{I.1})$$

Où $\eta_{\text{sol-heat}}$ est inférieure à 1 en raison de pertes thermiques et optiques et représente le rendement thermique du capteur. Q_c est la quantité de chaleur fourni pour le moteur thermique à la température T_H .

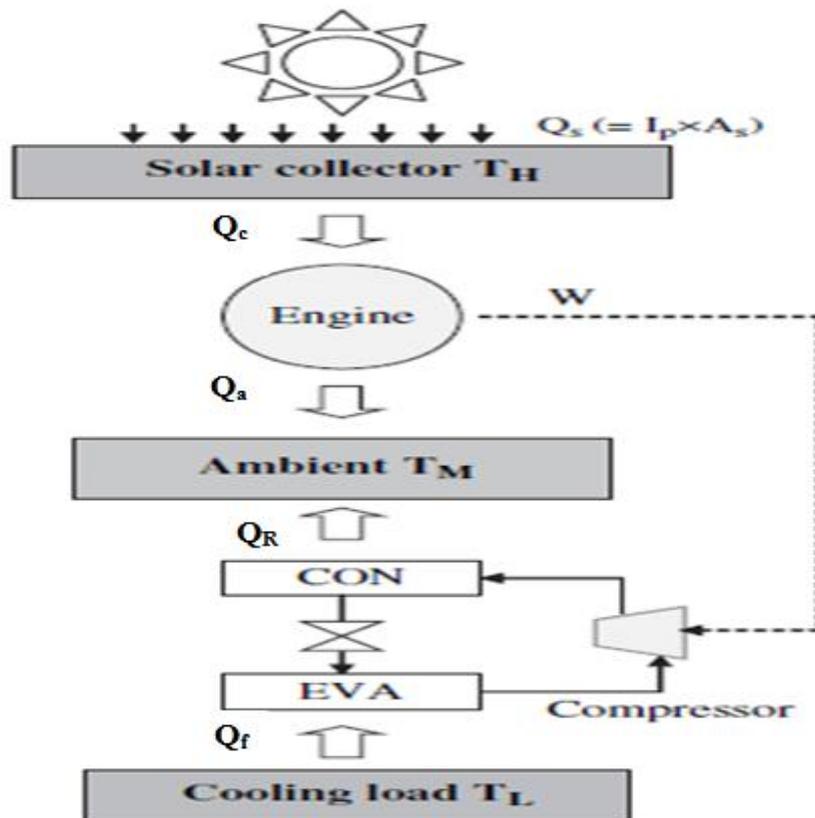


Fig. I.12: système de réfrigération thermomécanique [25].

Par ailleurs, un moteur thermique produit un travail mécanique W et rejette la chaleur Q_a à la température ambiante T_M . Dans ce cas, le rendement du moteur, $\eta_{\text{heat -pow}}$ est défini par le rapport : travail produit sur la quantité de chaleur Q_c :

$$\eta_{\text{heat -pow}} = \frac{W}{Q_c} \quad (\text{I.2})$$

Le travail mécanique W à son tour entraîne le compresseur du réfrigérateur pour extraire la chaleur Q_f de l'enceinte frigorifique à la température T_L . La chaleur perdue Q_R , égale à la somme de Q_f et de W , est rejetée vers le milieu ambiant à la température T_M . Le rendement du réfrigérateur est donné par l'équation suivant:

$$\eta_{\text{pow -cool}} = \frac{W}{Q_f} \quad (\text{I.3})$$

Le rendement global d'un réfrigérateur solaire thermomécanique est donné par le produit des deux équations (I.1), (I.2) et (I.3) :

$$\eta_{\text{sol -cool}} = \eta_{\text{sol -heat}} \times \eta_{\text{heat -pow}} \times \eta_{\text{pow -cool}} = \frac{Q_f}{Q_s} \quad (\text{I.4})$$

5. Conclusion

Le solaire à concentration (CSP) est l'un des technologies, qui connaît une forte croissance depuis quelques années. Cependant, par rapport aux ressources énergétiques fossiles combustibles, l'énergie solaire présente les caractéristiques inhérentes à la nature même de la ressource : intermittence de la disponibilité, fluctuation et faiblesse de la densité de flux énergétique. L'utilisation domestique ou industrielle de l'énergie nécessite une densité élevée et sa demande énergétique peut être en opposition de phase avec la période de disponibilité des énergies renouvelables de manière générale. En d'autres termes, l'énergie solaire ne couvre pas toujours les besoins [9].

Chapitre II

Moteur Stirling

Chapitre II: Moteur Stirling

1. Introduction

Comme le système de production du froid à étudier est basé essentiellement sur le moteur Stirling, une brève présentation de ce moteur semble nécessaire pour préfacier l'accès à la réalisation de l'objectif du présent travail.

Les moteurs Stirling constituent une famille de machines thermiques de nature très diversifiée, dont les principales caractéristiques sont d'être des machines alternatives à apport de chaleur externe, à enceinte de compression et de détente, sans clapets ni soupapes, à cycle fermé. Ces moteurs sont dotés de trois échangeurs thermiques; un régénérateur, un réchauffeur et un refroidisseur.

Le moteur Stirling, qui fut un succès commercial très important jusqu'au début du XXe siècle, connaît depuis peu une vogue nouvelle, car il possède de nombreux avantages: il est silencieux, peu polluant, facile à concevoir et à construire. Il peut utiliser n'importe quelle source de chaleur (énergie solaire, biomasse, gaz...), il offre la possibilité d'avoir un rendement plus élevé avec moins d'émission par comparaison avec le moteur à combustion interne. En outre, plusieurs obstacles technologiques qui avaient jusqu'ici limité son développement ont été levés. Ce moteur a été utilisé avec succès pour la conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant la technologie dite: 'Dish Stirling System' qui utilise un moteur Stirling placé au foyer d'un concentrateur parabolique [19].

2. Historique

2.1. Contexte

Le moteur Stirling, aussi appelé moteur à air chaud, est un moteur à combustion externe, c'est à dire que la source de chaleur se trouve « en dehors » du moteur contrairement à la plupart des moteurs que l'on trouve dans les voitures d'aujourd'hui.

Il fut inventé par Robert Stirling un pasteur d'origine écossaise né en 1790 et mort en 1878. Avant de se tourner vers des études de pasteur il suivit de brillantes études de 1805 à 1808 à l'université d'Édimbourg.

Le XIX^{ème} siècle, dont il fut contemporain, fut le théâtre d'un très grand nombre de découvertes scientifiques mais aussi de nombreux incidents techniques et accidents notamment liés aux chaudières à vapeur très utilisées à l'époque mais qui pouvaient aussi exploser très fréquemment en raison des très fortes pressions présentes à l'intérieur. Pour pallier ces difficultés Robert Sterling imagina en 1816 un moteur sans chaudière à « air chaud » au principe relativement simple mais néanmoins brillant. Le brevet fut déposé la même année mais devint effectif au début de l'année 1917 [15].



Robert Stirling

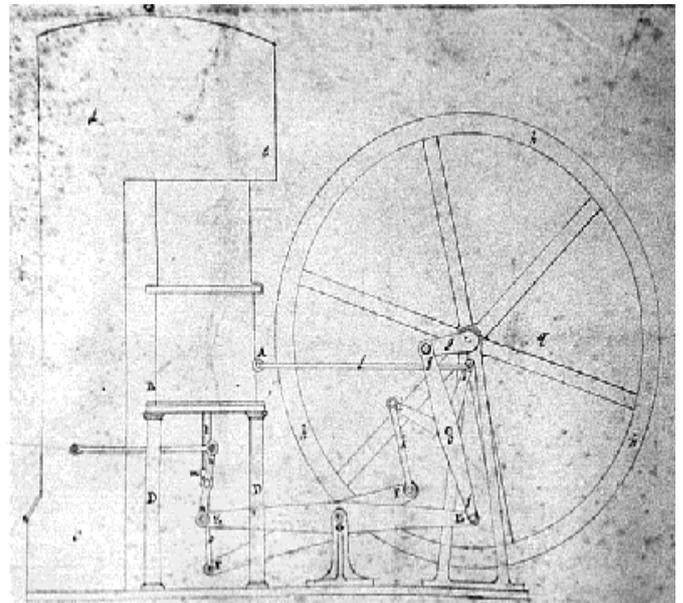


Schéma de Moteur Stirling de Robert Stirling

Fig.II.1: Moteur Stirling de Robert Stirling [21].

2.2. Développement au cours des années [15]

Le principe du moteur Stirling repose sur des concepts de base de la thermodynamique. Le cycle associé à ce type de moteur est le suivant: un gaz (de l'air dans la plupart des cas) est

chauffé par une source de chaleur externe. Il subit ensuite une détente, puis une détente et enfin une compression. Et pour augmenter le rendement de ce moteur Robert Stirling eu l'idée d'y intégrer un élément très astucieux, le régénérateur de chaleur qu'il appelait de façon pragmatique un « économiseur ». Ce régénérateur implanté dans la tuyauterie du montage permet d'éviter de trop grandes pertes d'énergie durant le cycle.

Et finalement c'est son frère, James Stirling, qui l'industrialisa pour la première fois en 1843 afin de l'utiliser dans l'usine dans laquelle il travaillait en tant qu'ingénieur. Ce moteur connut ensuite diverses applications jusqu'en 1922 comme par exemple pour pomper de l'eau où faire tourner des générateurs électriques. Malgré tout il ne connut pas le succès attendu et qu'il méritait sans aucun doute. Ceci en raison du monopole de la machine à vapeur plus répandue à l'époque et plus tard à cause de l'essor du moteur thermique à combustion interne qui s'imposa très vite sur le marché.

En 1938 la société Philips investit dans la conception et la réalisation d'un moteur Stirling qui donna le jour à un moteur automobile de plus de 200 chevaux ayant un rendement de plus de 30%. Mais là encore le succès n'a pas été au rendez vous.

Cependant avec les nouveaux besoins actuels concernant l'écologie et la recherche d'énergies alternatives ce moteur est actuellement l'objet d'un intérêt tout nouveau et est d'ores et déjà utilisé pour produire de l'énergie électrique (couplé avec des paraboles solaires pour sources chaudes et associé à un alternateur par exemple) ou même de la chaleur (chaudière de cogénération notamment). Il est donc fort probable qu'avec les progrès réalisés jusqu'ici par la science, en particulier dans le domaine des moteurs électriques (dont le Stirling pourrait servir à produire son électricité) ce moteur pourrait avoir de beaux jours devant lui.

3. Présentation d'un moteur Stirling

Dans un moteur à combustion interne, l'ensemble « 1 piston et 2 soupapes » peut être considéré comme l'ensemble mécanique de base nécessaire pour produire du travail au travers d'un cycle à 4 temps réalisé sur 2 rotations complètes de vilebrequin.

L'équivalent de cet ensemble mécanique dans un moteur Stirling est « 2 pistons » et éventuellement un régénérateur. Il n'y a pas de soupape, donc le moteur possède une architecture plus simple. Cet ensemble fonctionne sur un cycle comportant également 4 temps mais réalisés sur une seule rotation de vilebrequin. Les éléments mécaniques du Stirling ainsi que les volumes gazeux sont représentés sur les figures (II.2) et (II.3) [16].

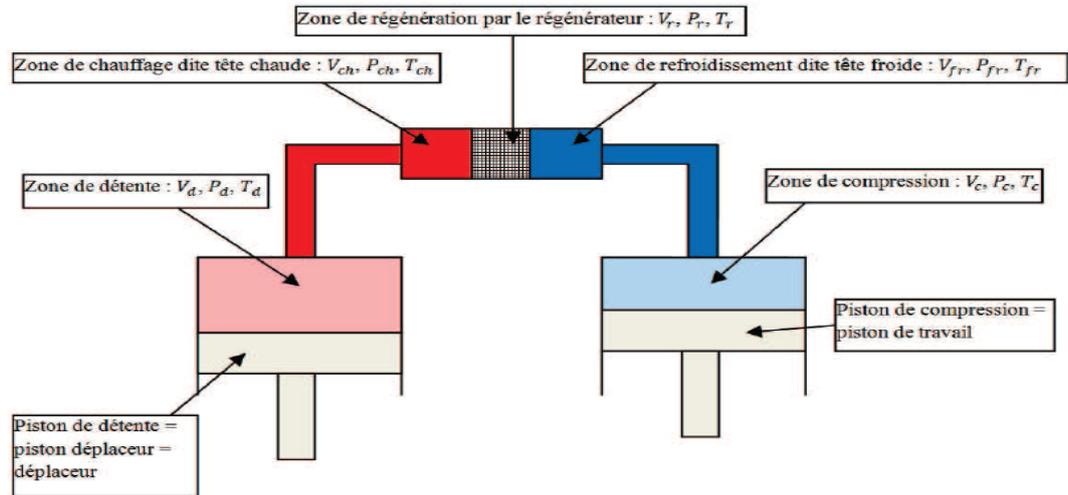
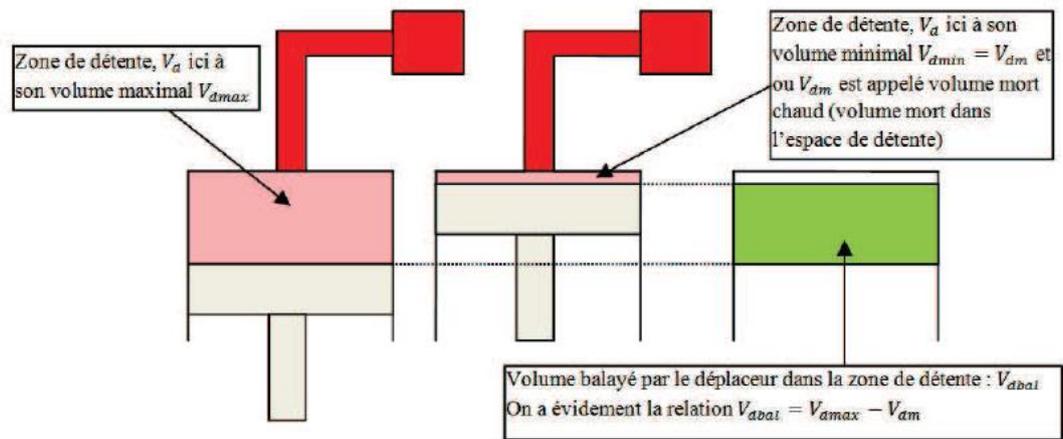


Fig. II.2 : Identification des éléments d'un Stirling [16].



De même on définit dans la zone de compression V_{cm}, V_{cmax} et V_{cbal} avec la relation équivalente : $V_{cbal} = V_{cmax} - V_{cm}$

Fig. II.3 : Définition détaillée des volumes [16].

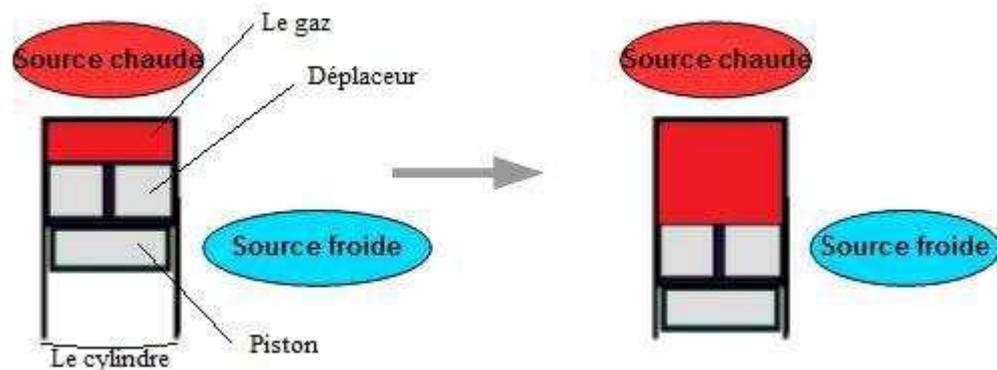
4. Principe de fonctionnement [15]

Pour comprendre le fonctionnement il faut avant tout prendre connaissance des principales pièces qui interagissent durant le cycle de Stirling. Tout d'abord on a au moins un cylindre fermé contenant un gaz enfermé à l'intérieur et où les échanges de chaleur vont s'effectuer. Puis on a deux pistons : un moteur qui se charge de fournir de l'énergie mécanique au moteur, un déplaceur qui a pour rôle de déplacer le gaz d'une zone chaude à une zone froide et vice versa (il laisse donc passer le gaz, il n'est pas tout à fait hermétique). Enfin on a un régénérateur qui récupère ou retransmet de la chaleur au gaz lors de son passage d'une zone à

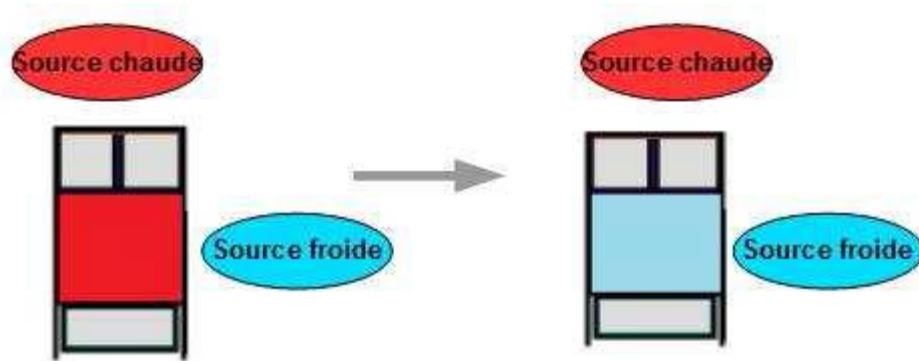
une autre. Ce régénérateur constitue un volume mort dans le moteur mais permet d'améliorer son rendement d'une façon significative car il évite de trop grandes pertes d'énergie lors du cycle. C'est en fait un échangeur de chaleur qui se trouve entre la zone chaude et la zone froide du moteur.

Le fonctionnement « mécanique » pour chaque type de moteur Stirling est sensiblement le même, on va donc prendre l'exemple du type Bêta qui nous a semblé être le plus simple pour en expliquer le fonctionnement global.

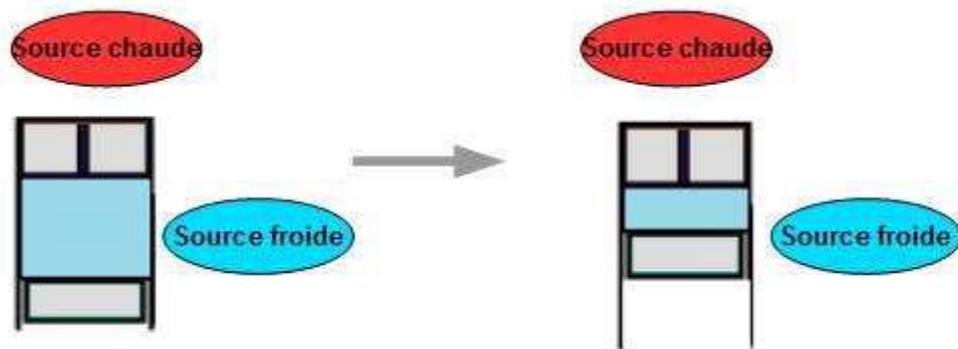
En pratique on a une source chaude qui fournit de la chaleur à un gaz enfermé dans un cylindre fermé. De par le fait sa température et sa pression augmentent, il se dilate alors et pousse un piston (appelé piston moteur) ainsi que le déplaceur qui s'éloignent ainsi du fond du cylindre. C'est la phase motrice du cycle décrit précédemment où l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique.



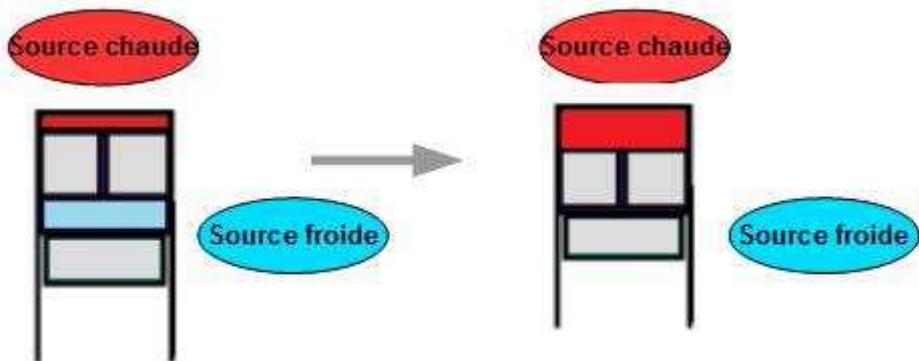
Ce mouvement est transmis à la bielle du vilebrequin inclus dans le moteur et associé au piston de travail. Ce vilebrequin synchronise les mouvements du piston et du déplaceur. Or la bielle associée au déplaceur est décalée par rapport à la première. Ce qui implique qu'à ce stade le mouvement oblige le déplaceur à redescendre au fond du cylindre chassant ainsi le gaz de la zone chaude vers la zone froide du moteur (où l'on a une source de froid tel que de l'air ou un jet d'eau froide par exemple).



Le gaz se refroidit alors, et lors du retour du piston dû à l'énergie mécanique précédemment fournie il se comprime. Comme la température du gaz est plus basse cette compression demande moins d'énergie mécanique que celle fournie par la dilatation du gaz à haute température, on a donc récupéré de l'énergie mécanique en surplus grâce à la source de chaleur.



Et pour finir le cycle, le déplaceur retourne se placer contre le piston en s'éloignant du fond du cylindre chassant ainsi le gaz vers la partie froide de ce piston pour qu'il soit chauffé à nouveau.



Le cycle se poursuit donc ainsi de suite avec ce déplacement d'air tantôt vers la partie froide et tantôt vers la partie chaude encore et encore (en répétant les étapes chauffage haute pression et compression basse pression).

5. Types de moteur Stirling

5.1. Type Alpha (α)

Un Stirling alpha contient deux pistons de puissance séparés, un piston « chaud », et un piston « froid ». Le piston chaud est situé près de l'échangeur avec la plus haute température, et le piston froid est situé près du point d'échange de température la plus basse.

Ce type de moteur a un ratio puissance-volume très élevé, mais a des problèmes techniques, liés (fréquemment) aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints. En effet, sur ce type de moteur, les 2 pistons sont imperméables [20].

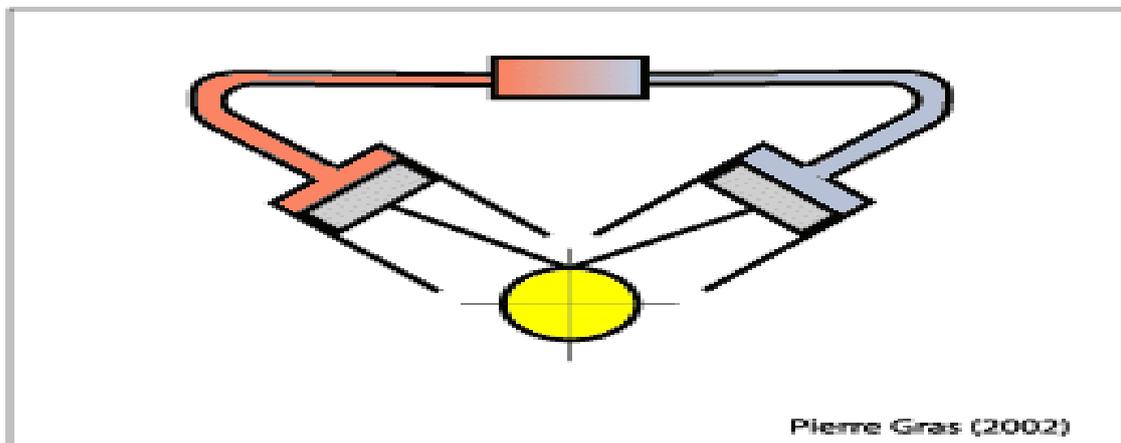


Fig. II .4: Type de moteur Alpha [20].

5.2. Type Bêta (β)

Ce type de moteur se différencie des 2 autres car il n'est composé que d'un seul, cylindre. Il est composé de 2 pistons : un déplaceur, étanche ou non, et d'un piston moteur étanche. Le principe de fonctionnement reste le même, mais du fait de sa conception, il est impossible d'utiliser de régénérateur [20].

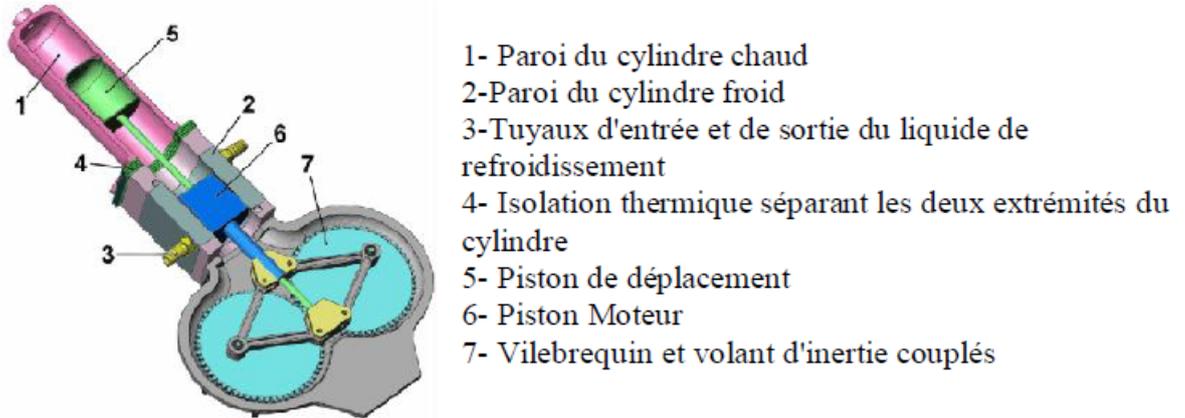


Fig. II .5: Type de moteur Bêta [5].

5.3. Moteur de type gamma (γ)

Les moteurs de ce type sont assez simples à concevoir du fait de leur mécanique peu complexe. Leur rendement est moins important que ceux des types présentés plus haut mais ils peuvent fonctionner avec de très faibles écarts de température, c'est à dire que pour certains de ces moteurs l'écart peut être de seulement 5°C (des petits moteurs de ce type sont capables de tourner seulement grâce à la chaleur d'une main humaine). On peut dire que ce moteur est une sorte de compromis entre le type Bêta et le type Alpha : on a deux cylindres séparés tout en restant très proches ce qui limite les pertes thermiques lors du déplacement du gaz [15].

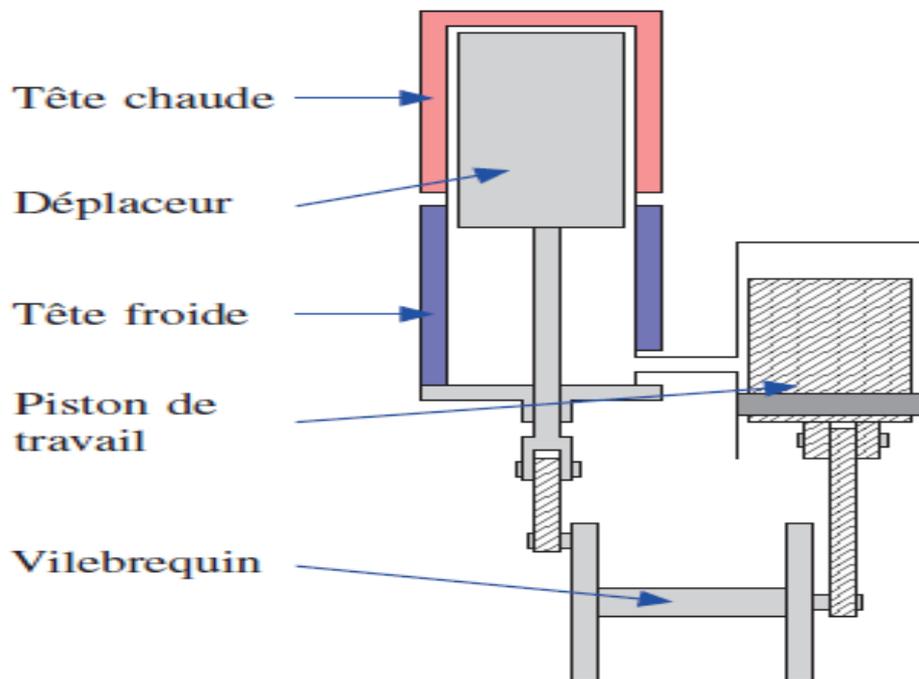


Fig. II.6: Type de moteur gamma [16].

6. Cycle de moteur Stirling

Dans un moteur de Stirling, un cycle thermodynamique se composant de deux transformations isothermes et deux transformations isochores est employé pour la production du travail mécanique à partir de l'énergie thermique (cycle moteur) ou pour la production de la chaleur ou du froid à partir de l'énergie mécanique (pompe à chaleur ou réfrigérateur de Stirling) [17].

6.1. Cycle idéale du moteur Stirling [12]

Le cycle de Stirling idéal se compose de quatre processus réversibles à l'intérieur comme le montre la figure (II.7)

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

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

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

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

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

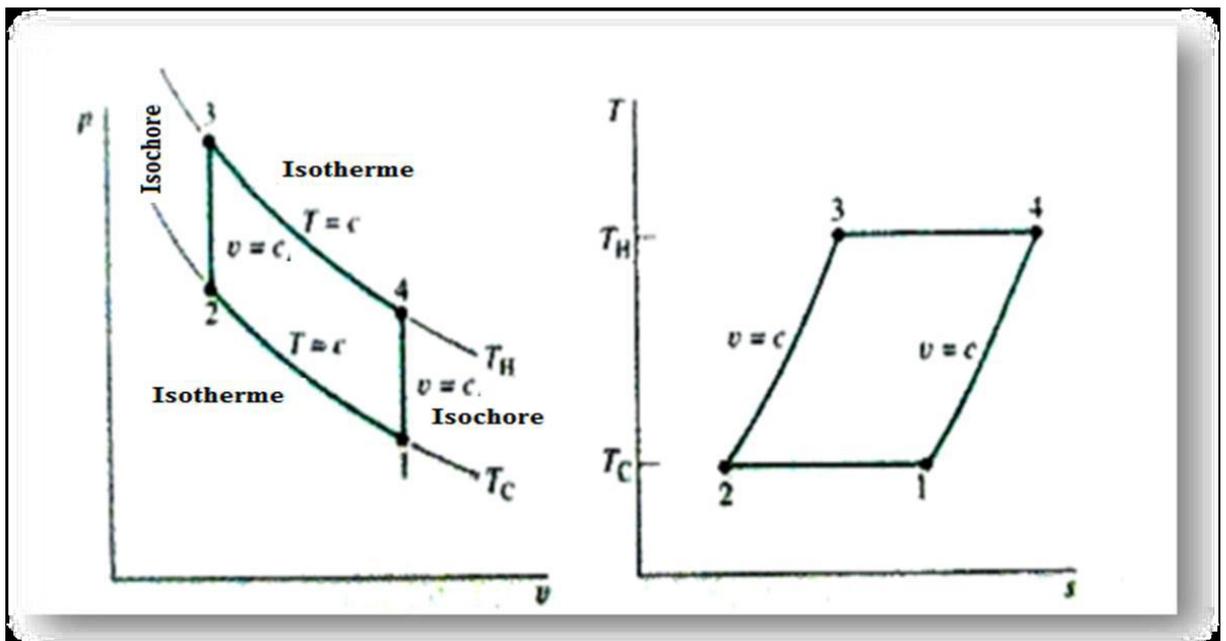


Fig. II.7: Diagramme du cycle Stirling théorique [12].

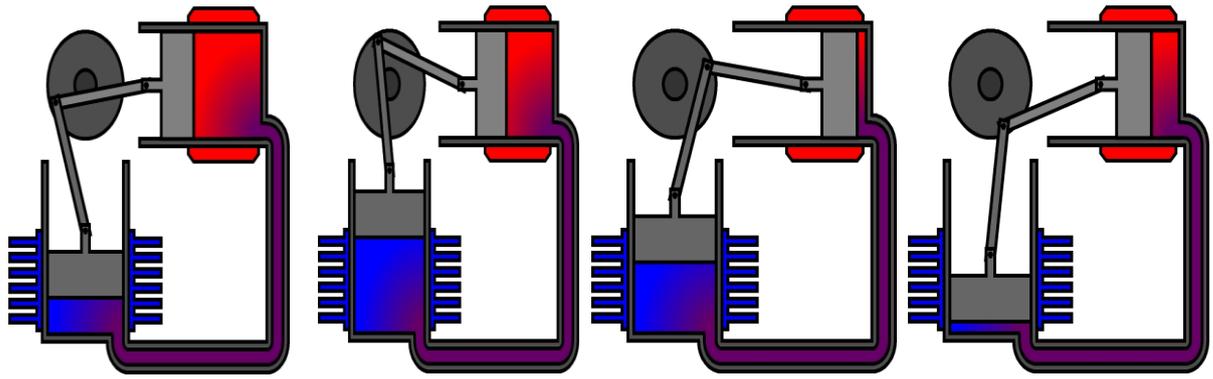
1^{er} temps du cycle2^{ème} temps3^{ème} temps4^{ème} temps

Fig. II.8: 4 temps du cycle pour un moteur alpha [22].

6.2. Cycle réel du moteur Stirling

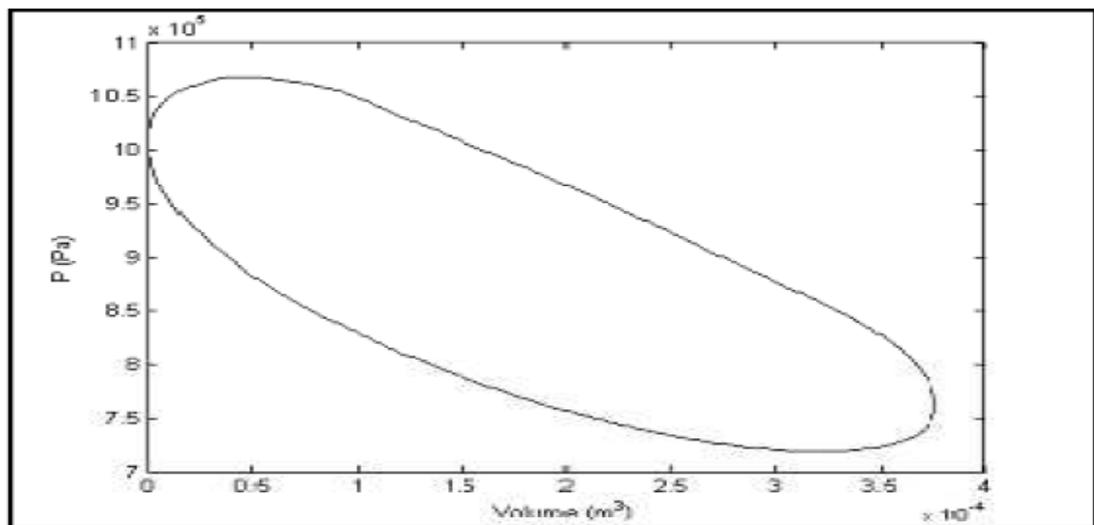


Fig. II.9: Diagramme indicateur d'un moteur Stirling réel [17].

En réalité le diagramme indicateur relevé expérimentalement sur un moteur Stirling (Fig. II.9) sera très sensiblement différent du diagramme théorique présenté précédemment. Il a une forme plus arrondie que ce dernier.

Ceci est dû essentiellement aux mouvements continus des pistons, différents des mouvements théoriques, aux grandes hétérogénéités de température instantanée dans le moteur et les surfaces d'échange thermique limitées et aux nombreuses irréversibilités présentes lors du fonctionnement du moteur du fait de la non uniformité du champ de température instantanée dans un moteur Stirling réel ; on ne peut pas parler d'un cycle thermodynamique réel : le

travail mécanique produit résulte d'une infinité de cycles thermodynamiques différents subis par les particules fluides présentes dans le moteur. On remarque que l'aire du diagramme indicateur réel est plus petite que celle du diagramme indicateur théorique. Cette diminution a pour conséquence de réduire la puissance fournie par le moteur car le travail est représenté par l'aire du diagramme fermé [17].

7. Utilisation de moteur Stirling dans la production de froid

On peut considérer que les moteurs Stirling font le travail de deux façons inverses. Si un côté est chauffé et l'autre côté est refroidi, on obtient un travail mécanique, mais si on donne un travail mécanique au moteur Stirling en le reliant avec autre moteur Stirling par un arbre de transmission de mouvement de rotation, on remarque que l'un des côtés du moteur Stirling entraîné est refroidi, tandis que l'autre côté est échauffé, ainsi on produit du froid par le moteur Stirling entraîné.

L'utilisation des cycles frigorifiques simples de type Stirling, utilisant de l'air ou un autre gaz inerte (hélium, hydrogène) comme fluide de travail, sans changement de phase, représente une alternative très intéressante pour pallier le problème de destruction de la couche d'ozone engendré par l'utilisation de fluides frigorigènes organo-chlorés. Le cycle théorique de Stirling est constitué de deux transformations isothermes au niveau des réservoirs, chaud et froid et de deux transformations isochores lors du passage du gaz de travail à travers le régénérateur de la machine. Ce cycle atteint, théoriquement, un coefficient de performance égal à celui de Carnot [26].

Le cycle Stirling pouvant fonctionner en moteur et en pompe à chaleur, il est possible de combiner deux cycles Stirling, le premier, moteur, fournissant le travail nécessaire au second. Il s'agit alors d'une machine tri-therme : le cycle moteur fonctionne entre une source chaude à la température T_c et le milieu ambiant à la température T_a , alors que le cycle « pompe à chaleur » fonctionne entre le milieu ambiant et une source froide à la température T_f [24].

8. Avantages et inconvénients

8.1. Avantages

- le silence de fonctionnement : il n'y a pas de détente à l'atmosphère comme dans le cas d'un moteur à combustion interne, la combustion est continue à l'extérieur du ou des cylindres. De plus, sa conception est telle que le moteur est facile à équilibrer et engendre peu de vibrations.

- le rendement élevé : fonction, il est vrai, des températures des sources chaudes et froides. Comme il est possible de le faire fonctionner en cogénération (puissances mécanique et calorique), le rendement global peut être très élevé.
- les utilisations très diverses du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude (du mW au MW) [18].

8.2. Inconvénients

- le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés.
- Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.
- la variété des modèles empêche une standardisation et par conséquent une baisse des prix.
- les problèmes d'étanchéité sont difficiles à résoudre dès qu'on souhaite avoir des pressions de fonctionnement élevées. Le choix du gaz "idéal", à savoir l'hydrogène pour sa légèreté et sa capacité à absorber les calories, se heurte à sa faculté de diffuser au travers des matériaux [18].

9. Conclusion

Les moteurs thermiques Stirling, adaptables, performants et économiquement viables, possèdent une particularité intéressante du point de vue écologique. Ces machines n'ont pas de combustion interne associée à une alimentation périodique en gaz frais et des rejets de gaz brûlés, et fonctionnent toujours avec le même gaz de travail qui est chauffé et refroidi de l'extérieur grâce à des sources variées (combustion, rayonnement solaire, récupération de chaleur perdue,...), ce qui leur confère une grande polyvalence [20].

Chapitre III

*Système solaire de production du froid
par moteur Stirling*

Chapitre III: Système solaire de production du froid par moteur Stirling

1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente un système solaire pour la production de froid utilisant un moteur Stirling, où se compose du concentrateur parabolique, ainsi que deux moteurs Stirling, dont le premier est un producteur du travail mécanique et tandis que le deuxième est un récepteur du travail en rotation inverse pour assurer la production du froid.

2. Description du système

Le système solaire de production du froid par moteur Stirling se compose essentiellement des éléments suivant :

- Un concentrateur parabolique
- Un récepteur solaire
- Un moteur Stirling couplé à un autre moteur Stirling à travers un système d'engrenage pour inverser la rotation.

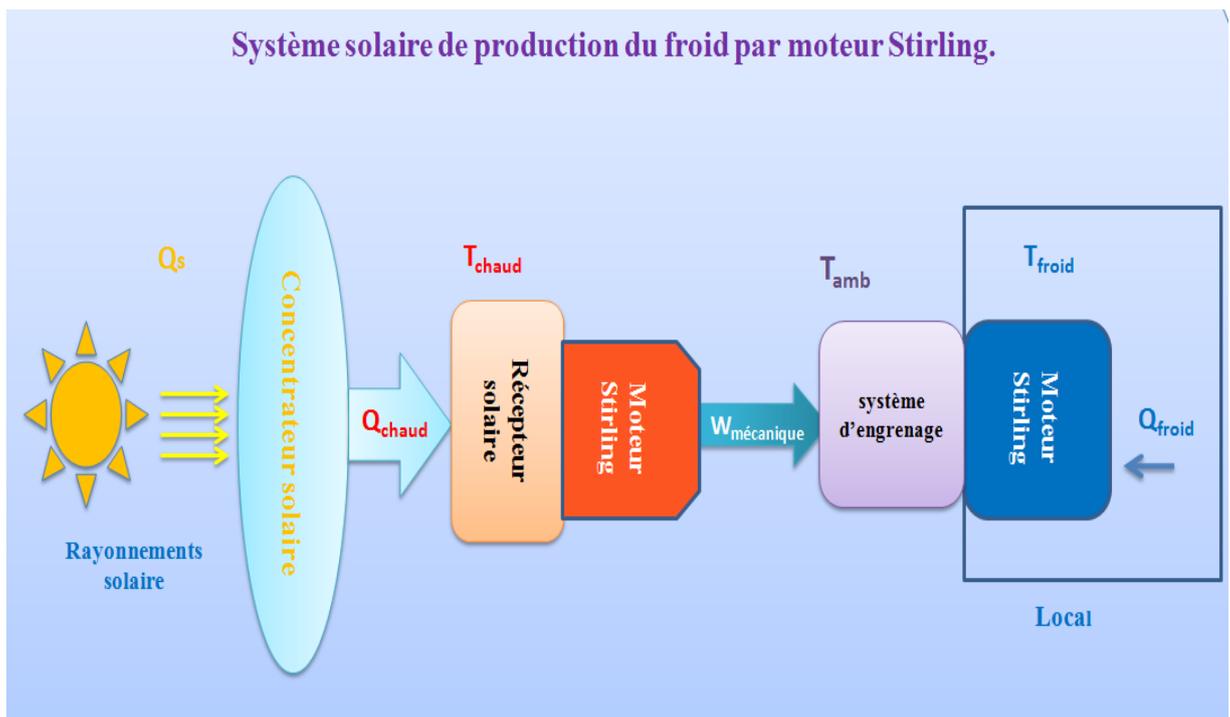
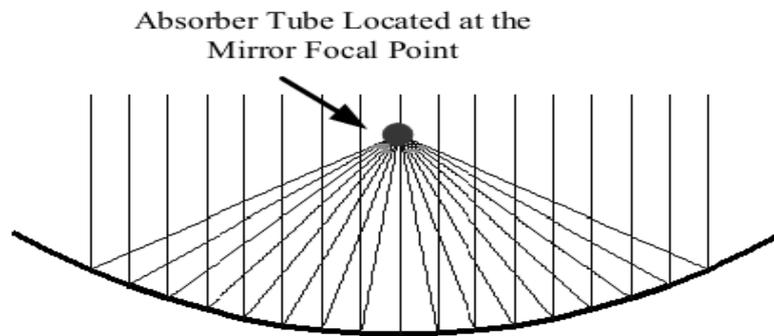


Fig. III.1: schéma de système solaire de production du froid par moteur Stirling

2.1. Concentrateur parabolique

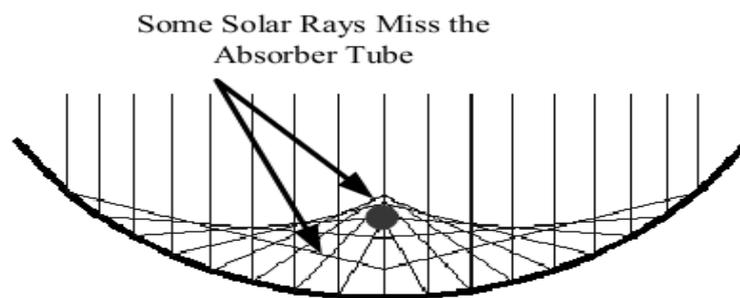
Les concentrateurs solaires utilisés pour des applications Dish Stirling sont des concentrateurs paraboliques. En effet, pour obtenir des températures élevées une haute concentration est nécessaire et la forme idéale d'un miroir convergent est celui de la parabole (Figure III.2,

III.3) ; tous les rayons incidents parallèles à l'axe principal se focalisent au foyer dans lequel on peut placer le récepteur :



Reflecting Mirror with Ideal Parabolic Cross Section

Fig. III.2: Rayons réfléchis par un miroir parabolique [5].



Reflecting Mirror with Non-ideal Cross Section (Circular)

Fig. III.3: Rayons réfléchis par un miroir sphérique [5].

Pour le fonctionnement du Moteur Stirling, des températures aussi élevées que possible sont souhaitées (jusqu'à 800°). La taille du concentrateur dépend évidemment de la puissance solaire requise. Comme ordre de grandeur, on peut considérer qu'un concentrateur de 10 m de diamètre peut fournir jusqu'à 25 KW d'électricité sous une insolation de 1000 W/m² [5].

2.2. Récepteur solaire

Le récepteur est le lien entre le concentrateur et le moteur Stirling appartenant à la boîte de protection du moteur. Il a pour but de récupérer le rayonnement provenant directement du concentrateur et de transférer la chaleur au fluide de travail du moteur. Ainsi le récepteur atteindra des températures importantes d'environ 650 °C [12].

Le récepteur a deux fonctions : premièrement, absorber autant de rayonnement solaire réfléchi par le concentrateur que possible et deuxièmement, le transfert de cette énergie sous forme de chaleur au gaz de travail du moteur.

Un miroir parabolique parfait réfléchit les rayons parallèles à un point, mais les rayons du soleil ne sont pas tout à fait parallèles parce que le soleil n'est pas une source ponctuelle. En outre, un concentrateur réel n'est pas parfaitement parabolique. Par conséquent, le rayonnement concentré au foyer est réparti sur une région (la plus forte concentration de flux se trouvant au centre et diminuant exponentiellement vers les bords).

En général, deux types de géométries de récepteurs sont utilisés avec les concentrateurs paraboliques : Les récepteurs externes et les récepteurs à cavité.

Les récepteurs externes sont généralement sphériques et absorbent le rayonnement venant de directions différentes. Les Récepteurs à cavité ont une ouverture à travers laquelle le rayonnement passe.

Comme le fonctionnement optimal du moteur Stirling nécessite de hautes températures, c'est les récepteurs à cavité qui sont utilisés dans la technologie Dish-Stirling pour leurs grandes capacités d'absorption à des pertes thermiques réduites [5].

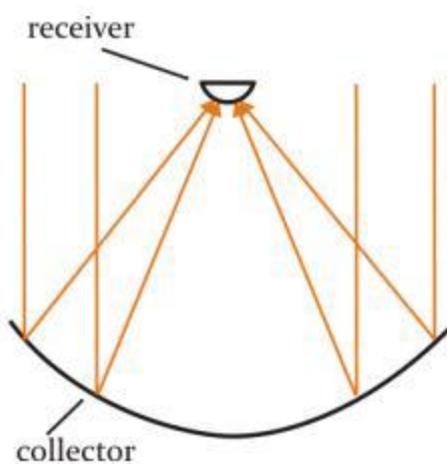


Fig.III.4: Schémas représentant un récepteur externe.

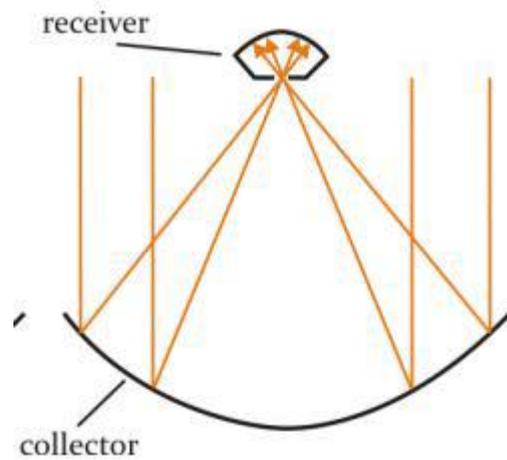


Fig. III.5: Schémas représentant un récepteur à cavité.

2.3. Première 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 chauffelette 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 [12].

Le moteur Stirling est constitué d'un système étanche remplie d'un gaz de travail (typiquement de l'hydrogène ou de l'hélium), qui est alternativement chauffé et refroidi. Le moteur fonctionne grâce au mouvement qui résulte de la compression et de la dilatation du gaz de travail alternativement quand il est vers la source froide ou chaude. Cette action produit un mouvement du piston moteur qui est transformée en puissance mécanique [5].

2.3.1. Fluides de travail du moteur Stirling

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

Le fluide de travail pour des moteurs Stirling d'une haute performance est souvent l'hydrogène ou l'hélium puisqu'ils ont une plus grande conductivité thermique et une capacité thermique par rapport à l'air suivant les indications du schéma (III.6) et schéma (III.7) respectivement.

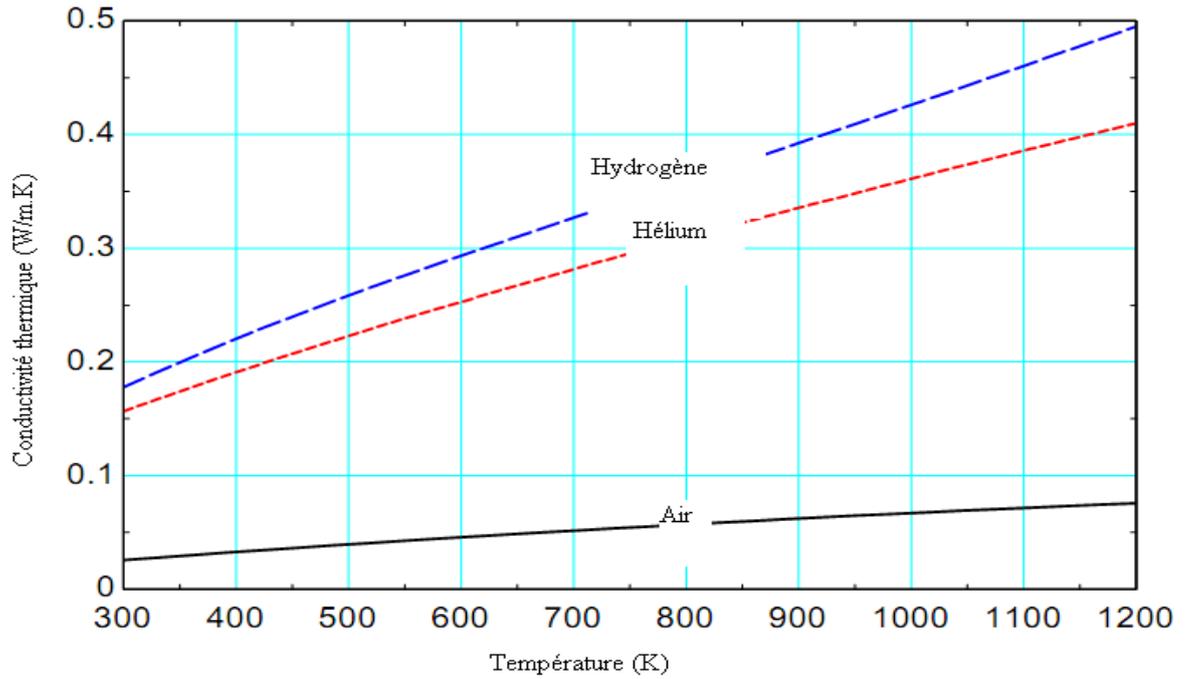


Fig.III.6 : Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température [12]

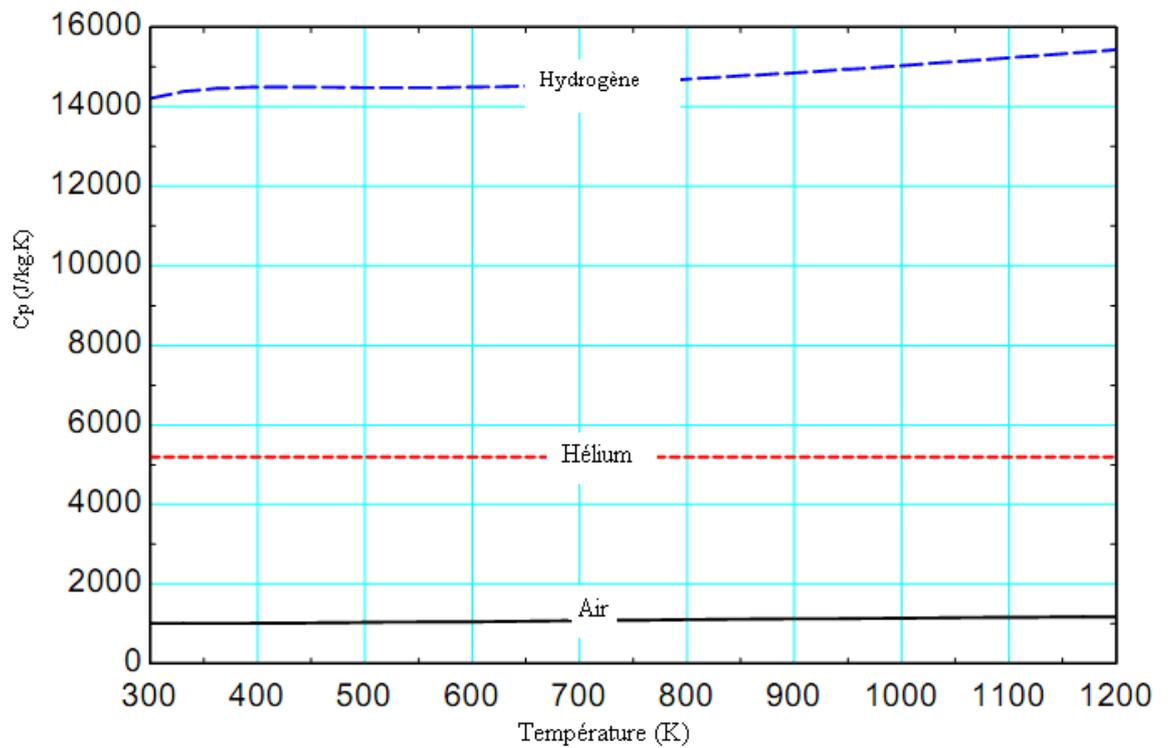


Fig. III.7: Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température [12]

Chacun des quatre procédés de cycle de Stirling dure moins de 10 ms dans un moteur, ainsi le choix du fluide de travail dépend hautement de la conduction thermique du gaz. Une plus grande chaleur spécifique pour le fluide de travail améliore également l'efficacité de l'énergie de transfert vers le régénérateur [12].

Les pertes de pression dans les aires de travail et le régénérateur dépendent de la viscosité et de la densité du fluide de travail. Un fluide de travail avec une faible viscosité et une densité aura comme conséquence des gouttes de plus basse pression, améliorant principalement le rendement thermique. Une comparaison des viscosités et des densités pour les fluides de travail est donnée sur les figures (III.8) et (III.9) respectivement.

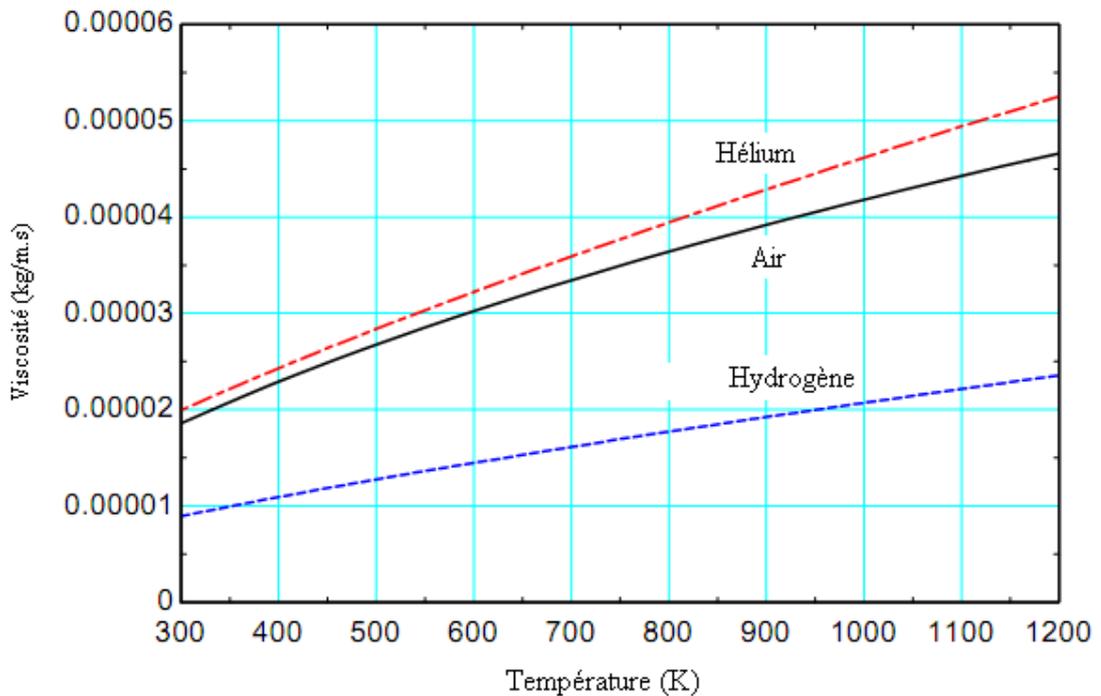


Fig.III.8 : Viscosités des fluides de travail en fonction de la température [12]

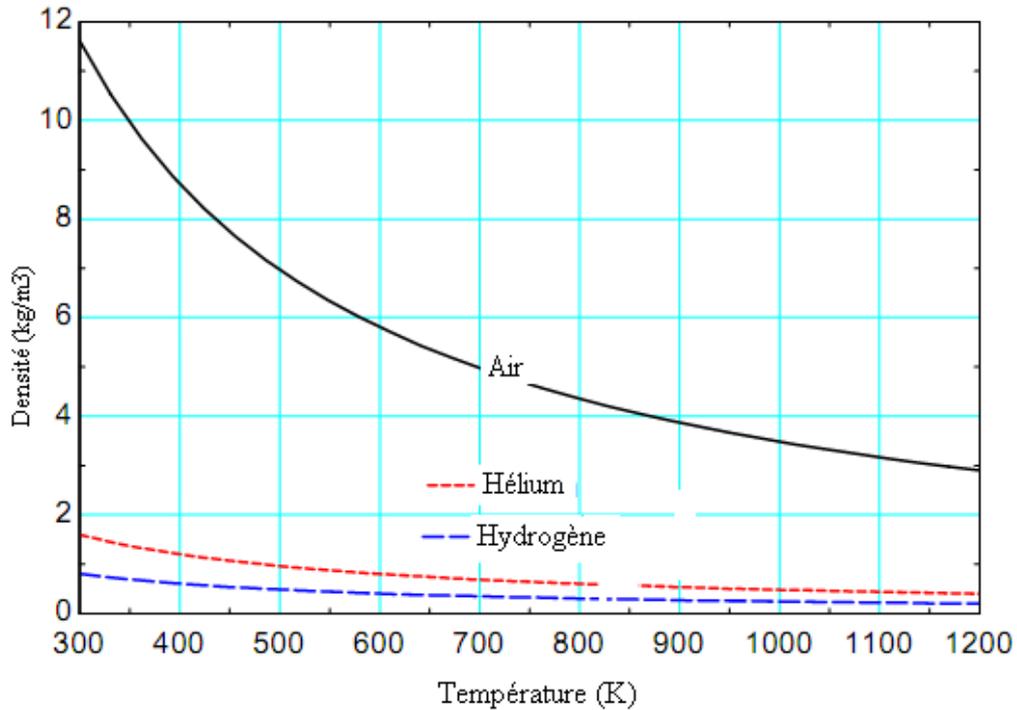


Fig.III.9: Densités des fluides de travail en fonction de la température [12]

Malgré les nombreux avantages de l'utilisation de l'hydrogène et de l'hélium pour les fluides de travail, un désavantage de l'hélium et de l'hydrogène est que les pertes de sceau seront plus grandes et plus difficiles à contrôler. Deux inconvénients supplémentaires sur l'hydrogène sont qu'il peut absorber dans différents matériaux provoquant la fragilisation par l'hydrogène, et il est combustible quand il est en contact avec l'oxygène. Dans l'ensemble, l'hydrogène est le premier choix pour le fluide de travail, car il a les propriétés de transport les plus efficaces pour améliorer les performances du moteur Stirling [12].

2.4. Système d'engrenage

Un engrenage est un mécanisme composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position fixe et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact et on dit que les deux roues sont conjuguées. La plus petite roue est appelée pignon, la plus grande est la roue [13].

Le rôle d'engrenage dans ce système est inverser la rotation de vilebrequin du premier moteur.

2.5. Deuxième moteur Stirling

Nous utilisons le deuxième moteur Stirling pour avoir des basses températures où il est entériné par le premier moteur en inversant le mouvement rotationnelle par un mécanisme intermédiaire avant le transférer à ce moteur.

3. principe de fonctionnement de système

Le concentrateur parabolique réfléchit les rayons solaires sur le récepteur qui se trouve au point focal de la parabole. Le récepteur absorbe le rayonnement solaire et chauffe ainsi le fluide de travail du moteur Stirling qui transforme alors cette chaleur en énergie mécanique [5]. Un deuxième moteur Stirling directement lié au vilebrequin du premier moteur exploite l'énergie mécanique reçue pour générer du froid.

4. Cycle thermodynamique de système

Dans le premier moteur de Stirling, le cycle thermodynamique se composant de deux transformations isothermes et deux transformations isochores est employé pour la production du travail mécanique à partir de l'énergie thermique, tandis que le deuxième moteur prend d'un travail mécanique du premier moteur pour la production de froid à partir de l'énergie mécanique (pompe à chaleur ou réfrigérateur de Stirling).

Au cours du cycle idéal de Stirling, le fluide de fonctionnement (gaz) subit les processus montrés dans la figure III.10 ci-dessous.

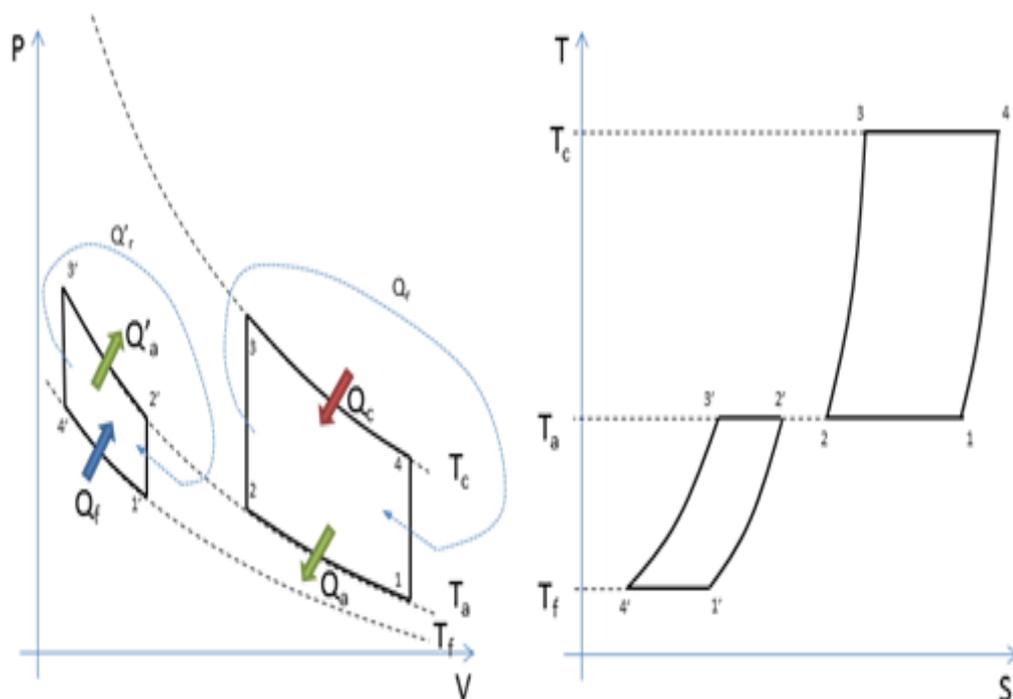


Fig. III.10: Diagramme indicateur d'un système Stirling [3].

5. Modélisation mathématique de système de production du froid par moteur Stirling

5.1. Première moteur Stirling

- Une compression isotherme 1-2 : le fluide de travail cède de la chaleur à la source froide.

$$Q_a = n \cdot R \cdot T_a \cdot \ln(V_{\min}/V_{\max}) \quad (\text{III.1})$$

- Chauffage isochore 2-3: le régénérateur interne à la machine cède de la chaleur au fluide de travail.

$$Q_r = m \cdot c_v \cdot (T_c - T_a) \quad (\text{III.2})$$

- Une détente isotherme 3-4 : transfert de chaleur d'une source de chaleur extérieure vers le fluide de travail ; le moteur produit le travail utile du cycle.

$$Q_c = n R T_c \ln V_{\max} / V_{\min} \quad (\text{III.3})$$

- Un refroidissement isochore 4-1: le fluide de travail cède de la chaleur au régénérateur interne à la machine.

$$-Q_r = m \cdot c_v \cdot (T_a - T_c) \quad (\text{III.4})$$

5.2. Deuxième moteur Stirling (Machine frigorifique)

- Chauffage isochore 1-2: le régénérateur interne à la machine cède de la chaleur au fluide de travail.

$$Q_r = m \cdot c_v \cdot (T_a - T_f) \quad (\text{III.5})$$

- Une compression isotherme 2-3: le fluide de travail cède de la chaleur à la source froide.

$$Q_a = n \cdot R \cdot T_a \cdot \ln(V_{\min}/V_{\max}) \quad (\text{III.6})$$

- Un refroidissement isochore 3-4: le fluide de travail cède de la chaleur au régénérateur interne à la machine.

$$-Q_r = m \cdot c_v \cdot (T_f - T_a) \quad (\text{III.7})$$

- Une détente isotherme 3-4 : transfert de chaleur d'une source de chaleur extérieure vers le fluide de travail ; le moteur produit le travail utile du cycle.

$$Q_f = n \cdot R \cdot T_f \cdot \ln(V_{\max}/V_{\min}) \quad (\text{III.8})$$

5.3. Travail total du cycle de moteur Stirling

Le travail total du cycle W_{tot} est égal à la somme du travail récupéré au cours de la détente (travail positif) et du travail qu'il est nécessaire à être fourni au cours de la compression du gaz (travail négatif) :

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{det}} + W_{\text{comp}} \quad (\text{III.9})$$

$$W_{\text{tot}} = \int_{\text{det}} PdV + \int_{\text{comp}} PdV \quad (\text{III.10})$$

avec $P = nRT / V$

ce qui donne :

$$W_{\text{tot}} = \int_{\text{det}} (nRT_{\text{max}} / V) dV + \int_{\text{comp}} (nRT_{\text{min}} / V) dV \quad (\text{III.11})$$

$$W_{\text{tot}} = nR (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \ln V_{\text{max}} / V_{\text{min}} \quad (\text{III.12})$$

5.4. Rendement d'un cycle de Stirling

On peut donc écrire la valeur du rendement d'un cycle de Stirling :

$$\eta = [R (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \ln V_{\text{max}} / V_{\text{min}}] / [C_v (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) + R T_{\text{max}} \ln V_{\text{max}} / V_{\text{min}}] \quad (\text{III.13})$$

Le rendement du cycle de Stirling est égal au rendement du cycle de Carnot. L'affirmation barrée ci-dessus, qu'on trouve trop souvent, est fautive si on a suivi le raisonnement exposé dans ce chapitre. En effet, le cycle de Carnot a pour valeur : $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_{\text{min}} / T_{\text{max}}$ ce qui est différent de la formule propre au rendement du cycle de Stirling. Par contre, si on suppose que l'énergie nécessaire au réchauffage isochore est entièrement récupérée au cours du refroidissement isochore, alors l'efficacité du moteur Stirling sera égale au rendement d'une machine de Carnot, jamais conçue, ayant les mêmes températures extrêmes de fonctionnement.

En effet, dans l'équation définissant le rendement η , le terme correspondant à l'énergie utile au chauffage isochore $C_v (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$ disparaît.

L'expression du rendement du moteur devient:

$$\eta = [R (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \ln V_{\text{max}} / V_{\text{min}}] / R T_{\text{max}} \ln V_{\text{max}} / V_{\text{min}} \quad (\text{III.14})$$

$$\text{ou, après simplification : } \eta = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / T_{\text{max}} \quad (\text{III.15})$$

5.5. Rendement de collecteur solaire parabolique

$$\eta_{\text{sol}} = \frac{Q_c}{Q_s} \quad (\text{III.16})$$

Avec $Q_s = I_p \times A_s$

5.6. Coefficient de performance (COP) de système solaire pour la production de froid par moteur Stirling

Le Coefficient de performance COP est le rapport entre l'énergie produite et l'énergie consommée.

Le Coefficient de performance, COP, est un terme alternatif au rendement couramment utilisé dans la thermodynamique présentant le rapport entre la quantité du froid produite par rapport au travail fourni W [25].

Dans le système collecteur parabolique Le rapport entre la Q_c et les Q_s de radiation est défini comme l'efficacité thermique d'un collecteur solaire thermique, de la chaleur η_{sol}

$$\eta_{sol} = \frac{Q_c}{Q_s}$$

Dans Le système le rendement d'un première moteur Stirling est donné par:

$$\eta_{S1} = \frac{W_{cycle}}{Q_c} = 1 - T_a/T_c \quad (III.17)$$

Et le rendement d'un deuxième moteur Stirling (Machine frigorifique) est donné par:

$$\eta_{S2} = \frac{Q_f}{W_{cycle}} = 1 - T_f/T_a \quad (III.18)$$

Ensuite, l'efficacité globale d'un Système solaire de production du froid par moteur Stirling est donnée par les trois efficacités dans les équations. (III.16), (III.17) et (III.18) comme suit:

$$\eta_{Sys} = \eta_{sol} \times \eta_{S1} \times \eta_{S2} = \frac{Q_c}{Q_s} \times \frac{W_{cycle}}{Q_c} \times \frac{Q_f}{W_{cycle}} = \frac{Q_f}{Q_s} \quad (III.19)$$

Le coefficient de performance (COP) est donné par:

$$COP_{sys} = Q_f/Q_s \quad (III.20)$$

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous décrivons les composants du système solaire pour la production de froid par moteur Stirling et le principe de fonctionnement et nous avons développé les lois thermodynamique pour cycle Stirling, le rendement et l'efficacité de ce système.

Chapitre IV

Résultats et discussion

Chapitre IV: Résultats et discussion

1. Introduction

Dans ce chapitre on applique le modèle thermodynamique présenté précédemment pour calculer le travail et prédire les performances du système solaire de production du froid par moteur Stirling. Les résultats seront présentés sous forme des courbes pour voir l'évolution de l'efficacité de ce système avec la variation de la quantité de l'énergie solaire fournie.

2. Données de Calcul thermodynamique

Les calculs seront effectués sur les moteurs Stirling de type Alpha avec l'air comme fluide de travail, en négligeant les volumes des canaux de lieu entre le piston et le régénérateur, et les pertes de système d'engrenage et du récepteur solaire.

Les caractéristiques dimensionnelles du moteur sont traduites sous la valeur de masse de l'air contenue dans le cylindre du moteur et les volumes maximum et minimum qui peuvent atteints pendant le fonctionnement. Ces données ont été prises de la littérature [23]. Le tableau ci-dessous présente toutes les données pertinentes du calcul.

Description	Symbole	Valeur
Masse de l'air	M	0.0032 kg
Masse molaire de l'air	M	0.029 kg/mol
Température ambiante	T _a	27 °C
Volume maximum de cylindre	V _{max}	775.935 cm ³
Volume minimum de cylindre	V _{min}	341.065 cm ³
Chaleur spécifique de l'eau	C _{P eau}	4180 J/kg.k
Chaleur latente de l'eau	L _{glace}	333.55 kJ/kg

Tab .IV.1 Données de Calcul thermodynamique

La chaleur spécifique de l'air est variable en fonction de température, elle est donnée par:

$$C_{p_{air}} = 1,9327 \times 10^{-10} \cdot T^4 - 7,9999 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 1,1407 \times 10^{-3} \cdot T^2 - 4,4890 \times 10^{-1} \cdot T + 1,0575 \times 10^3 \quad (IV.1)$$

3. Résultats et interprétation

3.1. Influence de température de la source chaude sur le rendement moteur Stirling motrice

La température de la source chaude est un paramètre très important puisqu'il détermine la gamme de fonctionnement du moteur Stirling. La figure (IV.1) montre son influence sur le rendement du moteur. Il est très clair que le rendement du moteur Stirling s'accroît en fonction de la température de la source chaude.

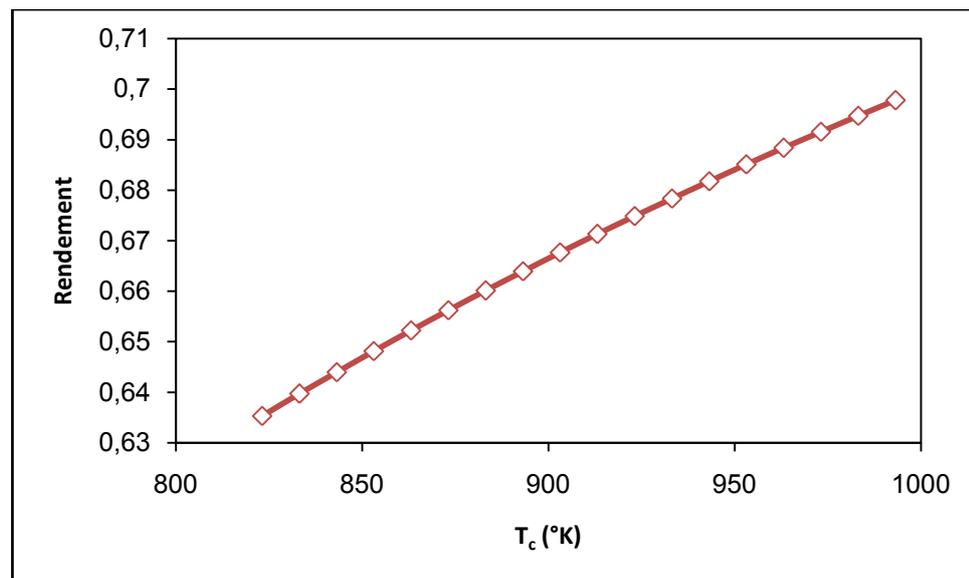


Fig. IV.1 : Rendement du premier moteur en fonction de la température chaude T_c .

3.2. Influence de température de la source chaude sur le travail total de moteur Stirling

L'augmentation de la température de source chaude entraîne une augmentation du travail d'expansion du fluide. Bien que le travail de compression soit constant, cela entraîne une augmentation du travail net. Dans la figure(IV.2), les variations du travail net avec l'augmentation de la température de source chaude sont présentées.

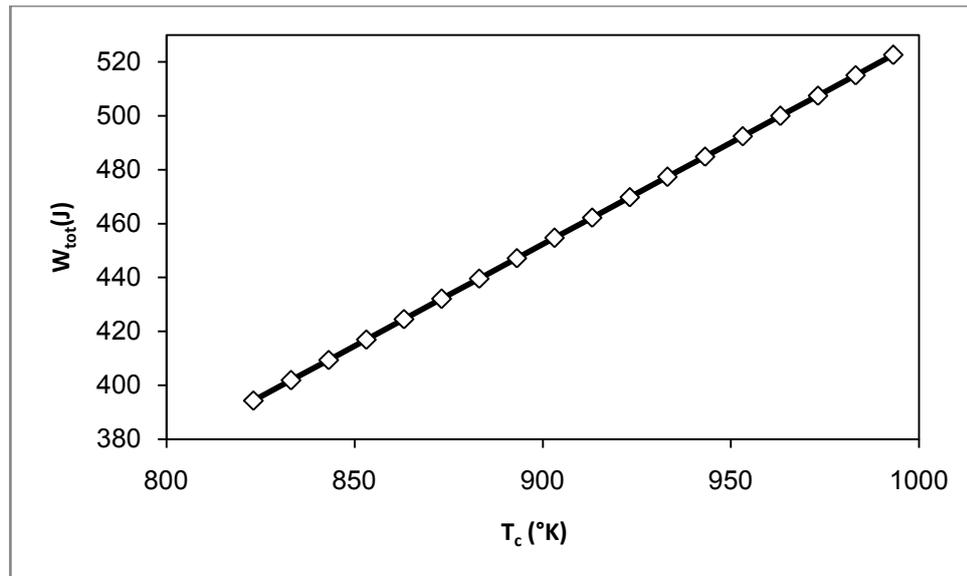


Fig. IV.2 : Travail total de moteur en fonction de température chaude T_c .

3.3. Influence de température de la source chaude sur le rendement de deuxième moteur Stirling

La figure IV.3 représente le rendement de deuxième moteur Stirling en fonction la température de source chaude .En remarque le rendement est augmente avec l'augmentation de la température de source chaude ,parce que à cause l'augmentation de travail total de cycle le rendement de deuxième moteur est aussi augmenter .Et le rendement de deuxième moteur Stirling est inferieur de le rendement de première moteur.

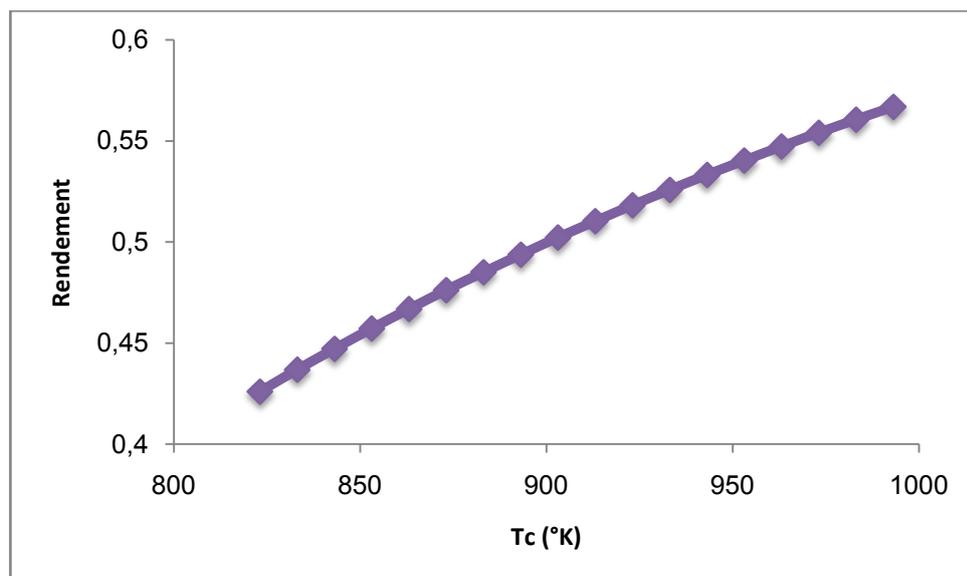


Fig. IV.3 : Rendement du deuxième moteur en fonction de la température chaude T_c

3.3. Influence de température de la source chaude sur le coefficient de performance de système

La figure IV.4 représente le coefficient de performance de système en fonction de température de source chaude. Il augmente avec l'augmentation de température de source chaude, car l'augmentation de cette température est suivie d'une augmentation de rendement de premier moteur Stirling, ce qui conduit à une augmentation de génération du froid de deuxième moteur Stirling.

El malgré ça, on remarque que la performance de système solaire de production du froid par moteur Stirling est faible où sa portée est limitée de 0.15 à 0.30, même si on relève la température de source chaude qui reste aussi limitée en fonction de la source et les matériaux du système. Ça c'est l'inconvénient de ce système et l'inconvénient de tous les systèmes solaires pour la production du froid.

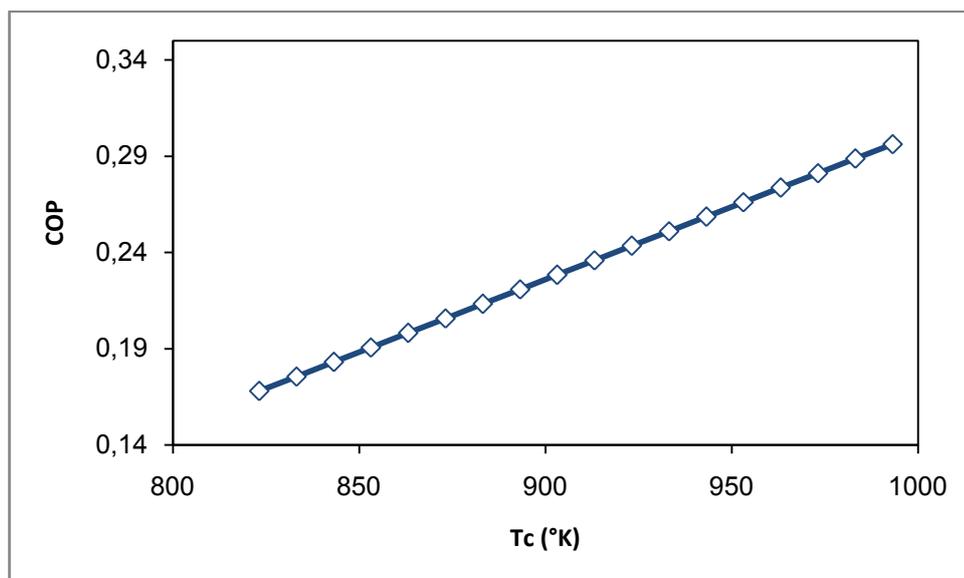


Fig. IV.4 COP de système en fonction de température chaude T_c .

3.4. Quantité de glace produite en fonction de la performance de système

On à : $Q_f = m_{\text{glace}} L_{\text{glace}} + C_p dT$

$$\text{Alors : } m_{\text{glace}} = \frac{Q_f - C_p dT}{L_{\text{glace}}}$$

La figure IV.5 représente la masse de glace produite par le système en fonction de la performance. La production du froid augmente avec l'augmentation de performance du système.

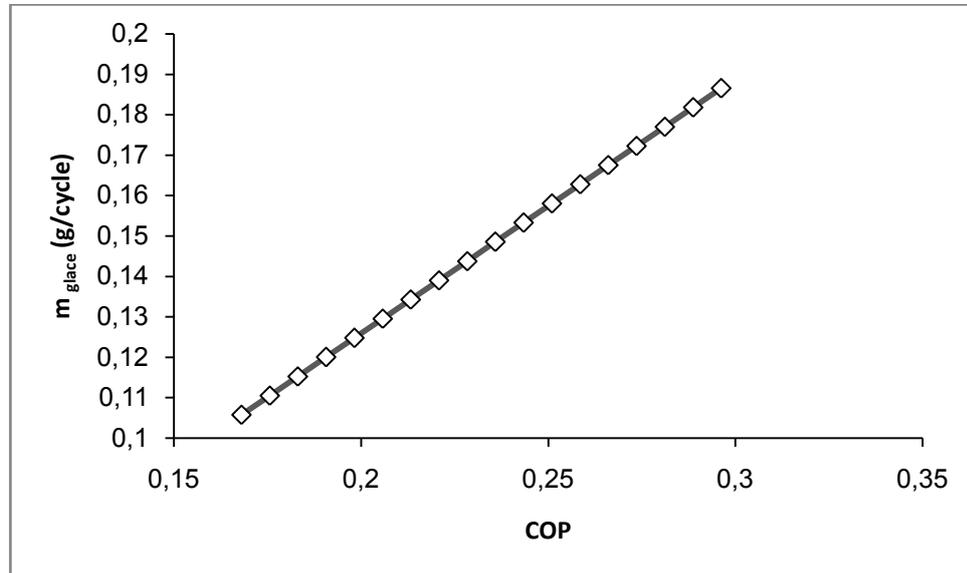


Fig. IV.5 Quantité de glace produite en fonction de la performance

3.5. Comparaison de système solaire de production du froid par moteur Stirling avec autres systèmes solaires

Le tableau suivant représente la performance typique des systèmes solaires existants de production du froid.

Suivant la figure IV.4 le coefficient de performance de production de froid par moteur Stirling se varie de 0.15 à 0.30 et en comparaison avec les autres systèmes comme le montre le tableau (IV.2), la valeur de COP de système étudié est considéré comme moyenne.

Système de refroidissement solaire	Température de la source chaude [°C]	COP _{solaire}	Type de collecteur solaire
Electricité solaire	-	0.3-0.75	Panneaux PV
Absorption	85-120	0.35-0.85	Capteur plan/ Collecteur concentrateur à tube évacué
Adsorption	60-165	0.15-0.35	Capteur plan/ Collecteur concentrateur à tube évacué
Desiccant	60-95	0.15-0.26	Capteur plan
Rankine	60-160	0.05-0.38	Capteur plan/ Collecteur concentrateur à tube évacué
Éjecteur	60-160	0.05-0.31	Capteur plan/ Collecteur concentrateur à tube évacué
Système solaire Stirling-Stirling	550-710	0.15-0.30	Concentrateur parabolique (dish-Stirling)

Tab. IV.2: Performance typique des systèmes de refroidissement solaire [27].

4. Conclusion

Il est très clair que le rendement du moteur Stirling s'accroît en fonction de la température de la source chaude. L'augmentation de la température de source chaude entraîne une augmentation du travail d'expansion du fluide. Cependant, la performance de système solaire de la production du froid par moteur Stirling est faible où sa portée pour le système étudié est limitée de 0.15 à 0.30.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les moteurs thermiques Stirling, adaptables, performants, économiquement viables et possèdent une particularité intéressante du point de vue écologique. Le solaire à concentration (CSP) est l'un des technologies utilisées pour alimenter les moteur de Stirling.

Les composants du système solaire pour la production de froid par moteur Stirling, le principe de fonctionnement et les lois thermodynamiques régissant la performance ont été expliqués dans le présent mémoire.

Les résultats ont montré que la performance de ce système est faible par rapport aux systèmes conventionnels, mais en comparaison avec les autres systèmes solaires concurrents la performance de production du froid par moteur Stirling est dans l'intervalle moyen qui de 0.15 à 0.3.

La masse de glace maximum pouvant être produite par le système étudié est de 0.2 g/Cycle, ce qui veut dire 1.5 kg pendant une heure si on considère que le cycle dure 0.5 s. Alors que pour des temps plus moins la production du froid peut être éventuellement augmentée, ce qui signifie que la vitesse de rotation de moteur ayant un effet important sur l'accélération de l'opération de refroidissement, tandis que la puissance traduite par la température de source chaude ayant un effet sur sa quantité.

La quantité du froid produite dépend de la puissance du moteur qui dépend à son tour de volume de cylindre et de la nature du fluide de travail, et la courte durée de refroidissement dépend de la vitesse du moteur, alors comme recommandation l'amélioration de performance de système de production de froid par moteur de Stirling doit jouer sur ces trois caractéristiques, à savoir: volume du cylindre, nature du fluide de travail et la vitesse de rotation du moteur.

Références bibliographiques

Bibliographique

- [1] Abdelaziz bennouna. L'énergie solaire thermique à concentration. Fiches techniques. décembre 2008.
- [2] Robert pitz-paal. « Solar energy conversion and photoenergy systems –high temperature solar concentrators » .Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)-2007.
- [3] Pierre PARDO. Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique. THESE. 9 décembre 2013.
- [4] ZAOUI Khalil et TALBI ALAMI Fayçal. L'application de l'énergie solaire au moteur stirling.2014-2015.
- [5] Benabdelaziz Kawtar. "Étude de la technologie solaire Dish-Stirling." Mémoire de Projet de fin d'étude. 1 Juillet 2013.
- [6] syndicat des énergies renouvelables. Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique. Document. juin 2012
- [7] Quoilin Sylvain. "Les Centrales Solaires à Concentration." Université de Liège. Mai 2007
- [8] N OUNADJELA. Etude bibliographique sur les centrales solaires thermodynamiques. Chapitre.2014.
- [9] Jean-François HOFFMANN. Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en oeuvre des matériaux naturels ou recyclés. Thèse. 3 décembre 2015.
- [10] Les centrales solaires à miroir de Fresnel. [http://www.ecosources.info/dossiers/ Centrale miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique](http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique).26 février 2017.
- [11] Le solaire thermodynamique. <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/l-energie-solaire/l-energie-solaire-thermodynamique/centrales-a-capteurs-cylindro-paraboliques.html>.21 février 2017.
- [12] Abdelmadjid KADDOUR. Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal. Thèse. Janvier 2013.
- [13] Mme GHARBI Née DJEBBAR NADIRA. Automatisation du calcul des dents d'engrenage dans une transmission composée. Mémoire.2005.
- [14] Ministère de l'énergie .Le Programme des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique.12-04-2017.

- [15] Bilel Chakroun, Thomas Douguet, Maxime Chevallier, Gaëtan Grimberger, Nelson Dionisi Mehdi El Ouzgane. Conception et fabrication d'un moteur Stirling type alfa en aluminium. *Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2010-33*. 2010.
- [16] Nicolas Lanciaux. Contribution au développement d'un moteur Stirling : de la cogénération dans le bâtiment à l'autonomie énergétique. L'université D'Évry-val D'Essonne. 13 janvier 2015
- [17] Souad FETHALLAH. modélisation et optimisation des cycles thermodynamiques de puissance (Rankine-Brayton-Stirling en vue de la production d'énergie. mémoire magister université Kasdi Merbah Ouargla. 2012.
- [18] MAAMRI WALID. Etude d'un moteur à air chaud (Stirling), application à la conversion de l'énergie théorique solaire. Mémoire de master université de Biskra. Juin 2013.
- [19] M. Abbas, N. Saïd et B. Boumeddane. optimisation d'un moteur Stirling de type gamma. *Revue des énergies renouvelables* vol. 13 n°1 (2010) 1 – 12. 2010.
- [20] LAVINIA GROSU et al. étude expérimentale d'un moteur Stirling LTD de type gamma, influence des paramètres physiques et géométriques sur le fonctionnement du moteur. Comparaison avec des modèles de simulation. Article.
- [21] STPI/P6-3/2009 – 27. Conception et réalisation d'un moteur Stirling. *Expérimental*. 22/06/2009.
- [22] Les moteurs Stirling : Une véritable alternative aux méthodes classiques de conversion de l'énergie des Biogaz, par JP Vernet président d'EOSgen-technologies.
- [23] محمد الزحيلي, ماهر الفليح, ياسر الحمد. دراسة محرك ستيرلينغ مشروع. 2005-2006.
- [24] froidstirling. file:///D:/zakaria%20universit%C3%A9/memoire%20de%20fin%20d'etude(moteur%20stirling)/Froid%20Stirling%20%E2%80%94%20Wikip%C3%A9dia.html. janvier 2014.
- [25] Ahmed OUBIRI. Simulation numérique du refroidissement de l'absorbeur d'un réfrigérateur solaire à adsorption par convection. Mémoire master. Juin 2012
- [26] Nadia MARTAJ et al. Machine frigorifique Stirling de type Beta. Etude numérique et expérimentale. 2011
- [27] Mehdi Zeyghami, D. Yogi Goswami n, Elias Stefanakos. A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods. 6 July 2015.

