



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques de Fès
Département de Génie Industriel



masen
Moroccan Agency
for Solar Energy

Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

Benabdelaziz Kawtar

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Spécialité : Ingénierie en Mécatronique

Intitulé

**Étude de la technologie solaire
Dish-Stirling**

Lieu : MASEN
Réf : /IMT13

Soutenu le 1 Juillet 2013 devant le jury :

- Pr. L. HAMED (Encadrant FST)
- Mr. A. JAMRANI (Encadrant Société)
- Pr. M. EL HAMMOUMI (Examineur)
- Pr. M. RJEB (Examineur)

A mes très chers parents

Bouchikhi Farida et Benabdelaziz Rachid

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout
l'amour et le respect que j'ai pour vous.

Je vous dédie ce travail.

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement mes encadrants : Professeur Hamedi L'Habib pour sa patience, son suivi et ses conseils, non seulement au cours de ce projet de fin d'étude mais aussi au cours de toute ces années à la FSTF et Mr Jamrani Abderrahim, pour m'avoir confié ce projet, pour sa confiance, sa disponibilité, ses idées et conseils, ainsi que pour son aide précieuse de tous les jours. Je les remercie pour les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués tant au niveau de mon travail actuel qu'au niveau de ma carrière future et ceci dans l'apprentissage de mon métier d'ingénieur au sein d'un aussi grand organisme.

Merci aux professeurs El Hammoumi Mohammed et Rjeb Mohammed pour leurs conseils et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon projet en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'exprime également ma gratitude à Mr Abou-Otmane Houssam, Mlles Khadija Tahiri Joutei Idrissi Hassani et Kamilia M'hamdi qui m'ont apporté leur aide ainsi qu'à tous les membres de l'organisme MASEN pour leur accueil et à tous ceux qui ont fait que ce stage de fin d'étude s'est passé dans les meilleures conditions possibles.

Mes dernières pensées iront vers mon frère et mes chers parents, qui m'auront soutenus jusqu'au bout dans mes choix, mes peines et mes joies et sans qui je n'aurais rien pu accomplir.

Résumé

Ce rapport est le résultat du Projet de fin d'étude effectué entre le 4 Février et le 17 Juin 2013 au sein de MASEN (Moroccan Agency for Solar Energy), dans le cadre de la formation du cycle d'ingénieur Mécatronique à la FSTF.

Dans le contexte environnemental actuel, les technologies électriques solaires thermiques CSP peuvent jouer un rôle important pour répondre à la demande en énergie électrique propre. Parmi elles, la technologie Dish-Stirling relativement récente, est l'objet de ce projet de fin d'étude.

Afin de connaître les potentialités de développement de cette technologie, le projet s'attache à répondre aux différentes questions qui portent sur les performances et les coûts du système, tout d'abord à travers une étude comparative aux autres technologies du solaire thermique et photovoltaïque puis par l'étude technique de la technologie et de son organe de puissance (moteur Stirling) et finalement, à travers une simulation des performances et des coûts.

Mots clés : Énergie Solaire, technologie CSP, Dish-Stirling, Moteur Stirling, régénérateur, SAM simulation.

Abstract

This report is the result of the Final Project study conducted between February 4 and June 17, 2013 in MASEN (Moroccan Agency for Solar Energy), through the formation of Mechatronics Engineering in the FSTF.

In the current context, the solar thermal electric technologies CSP can play an important role in the clean electricity demand. Among them, the recent Dish-Stirling technology is the subject of this final project study.

To know the development potential of this technology, the project seeks to answer the various questions that relate to the performance and cost of the system, first through a comparative study with other solar thermal and photovoltaic technologies then by a the technical study of the technology and its power element (Stirling engine) and finally, through a simulation of performance and cost.

Keywords: Solar Power, CSP, Dish-Stirling, Stirling engine, Regenerator, SAM simulation.

Table des matières

Chapitre 1 : Présentation de la société	14
<i>I. Présentation du plan solaire marocain :</i>	<i>15</i>
1. Les grands axes de la politique énergétique du Maroc :	16
2. Dates clés :	17
<i>II. Présentation générale de la société :</i>	<i>17</i>
1. Présentation de MASEN :	17
2. Statut de MASEN :	18
3. Organigramme de MASEN :	18
4. Les projets de MASEN :	19
Chapitre 2 : Le solaire thermique concentré	20
<i>I. Les technologies solaires</i>	<i>21</i>
<i>II. Concentration Linéaire</i>	<i>23</i>
1. Centrale cylindro-parabolique	23
2. Centrale à miroir Fresnel	24
<i>III. Concentration ponctuel.....</i>	<i>26</i>
1. Centrale à tour solaire.....	26
2. Centrale Dish-Stirling.....	27
<i>IV. Centrale à cheminée</i>	<i>28</i>
Chapitre 3 : État de l'art de la technologie Dish-Stirling	29
<i>I. Description du système :</i>	<i>30</i>
<i>II. Concentrateur et système de poursuite du soleil.....</i>	<i>31</i>
1. Miroirs et concentration :	31
2. Système de poursuite du soleil.....	34
<i>III. Récepteur :</i>	<i>36</i>
1. Récepteur à tube directement illuminé	37
2. Récepteur à illumination indirecte :	38
<i>IV. Moteur Stirling :</i>	<i>39</i>
<i>V. Pertes thermiques :</i>	<i>41</i>
<i>VI. Comparaison avec les technologies CSP et le PV :</i>	<i>43</i>
Chapitre 4 : Le moteur Stirling.....	46
<i>I. Introduction :</i>	<i>47</i>
<i>II. Principe de Base :</i>	<i>48</i>
<i>III. Cycle Stirling théorique :</i>	<i>48</i>
<i>IV. Différents types de Moteurs Stirling :</i>	<i>49</i>
1. Moteur Alpha :	50
2. Moteur Beta :	51
3. Moteur Gamma :	52
4. Autres classifications	55

V. Le régénérateur :	57
VI. Cycle Stirling Réel :	59
V. Fluide de travail :	63
VII. Conclusion :	68

Chapitre 5 : Performances et Potentiel économique par simulation sur le logiciel SAM..... 70

I. Étude des performances :	71
1. L'équation fondamentale de la collecte solaire.....	71
2. Concentrateur :	72
3. Récepteur :	73
4. Moteur Stirling.....	74
5. Puissance parasite et alternateur :	75
6. Production d'énergie :	75
7. Coût moyen actualisé de l'énergie (LEC).....	76
II. Potentiel de l'énergie Solaire au Maroc :	77
III. Logiciel SAM :	79
1. Présentation :	79
2. Analyse des paramètres d'entrée.....	81
IV. Simulation et résultats :	90
1. Simulation des performances :	92
2. Simulation des couts.....	101
3. Résultats du LCOE :	103
Bibliographie :	108
Annexes :	111

Listes des Figures

Figure 1 : Sites du projet.....	15
Figure 2: Organigramme de MASEN.....	18
Figure 3 : Schéma de principe du CSP.....	21
Figure 4 : Schéma résumant le principe des 4 technologies [1].....	22
Figure 6: Principe de fonctionnement d'une centrale à capteur cylindro-parabolique à huile avec stockage à sel fondu et cycle de Rankine [2].....	23
Figure 5 : Schéma de principe de la centrale cylindro-parabolique [EDF].....	23
Figure 7: Centrale cylindro-parabolique [2].....	24
Figure 8: Schéma de principe de la centrale à miroirs Fresnel [EDF].....	24
Figure 9 : Schéma de principe d'une centrale avec récepteurs Fresnel.....	25
Figure 10: Centrale à miroirs Fresnel.....	25
Figure 12: Principe de fonctionnement d'une centrale à tour.....	26
Figure 11 Schéma de principe d'une centrale à tour solaire.....	26
Figure 13: Tour solaire à Séville.....	27
Figure 14 : Schéma de principe d'une centrale Dish-Stirling.....	27
Figure 15: Installations de Dish-Stirling.....	27
Figure 16 : Schéma de principe d'une centrale à cheminée.....	28
Figure 17: Prototypage de cheminée solaire a Manzanares [2].....	28
Figure 18: Schéma décrivant le système Dish-Stirling [7].....	30
Figure 19 : (a) Rayons réfléchis par un miroir parabolique (b) Rayons réfléchis par un miroir sphérique [14].....	31
Figure 21: Dish-Stirling avec concentrateur à membranes tendus[26].....	32
Figure 20: Approximation de la forme parabolique par un ensemble de miroirs plans.....	32
Figure 22 Réflexion d'un faisceau hors axe du miroir parabolique [14].....	33
Figure 23: Poursuite du soleil durant une journée [6].....	34
Figure 24: Suivi solaire en azimut-élévation.....	34
Figure 25: Suivi polaire.....	35
Figure 26: Schémas représentant un récepteur externe [15] Figure 27: Schémas représentant un récepteur à cavité [15].....	36
Figure 28: Schéma d'un récepteur Pool boilers [8] Figure 29: Schéma d'un récepteur à reflux[8].....	38
Figure 30: Schéma d'un moteur Stirling cinématique avec récepteur directement illuminé.....	39
Figure 31: Pertes d'énergie et énergie utile dans le système Dish-Stirling SBP.....	41
Figure 32: Tableau en cascade de l'énergie pour le système SBP.....	42
Figure 33: Schéma de la chaîne énergétique du système Dish-Stirling.....	42
Figure 34: Comparaison entre le rendement des différents types de panneaux solaires et d'un système Dish-Stirling [23].....	44
Figure 35: Efficacité moyenne des différentes technologies CSP [23].....	44
Figure 36: Cycle théorique du moteur de Stirling.....	48
Figure 37: Configurations mécaniques du moteur Stirling.....	49
Figure 38: Schéma du moteur Alpha.....	50
Figure 39: Illustration d'un moteur Alpha à 4cylindres.....	51
Figure 40: Coupe d'un moteur Stirling bêta à entraînement rhombique.....	51
Figure 41: Schéma de principe du moteur Gamma.....	52
Figure 42: Schéma du piston du moteur Gamma en position haute.....	52
Figure 43: Schéma illustrant les différents composants d'un moteur à piston libre.....	56
Figure 44: Régénérateur dans un moteur Alpha [19].....	57
Figure 45: Régénérateur dans la paroi du cylindre d'un moteur beta.....	57
Figure 46: Diagramme indicateur théorique.....	58
Figure 47: Cycle Stirling réel mesuré par le LATEP.....	59
Figure 48: Effet de la conductivité thermique du régénérateur sur les performances [25].....	61
Figure 49 : Effet de la capacité thermique du régénérateur sur les performances. [25].....	61
Figure 50: Effet de la porosité des régénérateurs sur les performances.....	62
Figure 51: Diagramme Puissance en fonction de la vitesse.....	63

Figure 52: Diagramme Efficacité thermique en fonction de la température de la source chaude pour différents gaz [20].....	65
Figure 53: Diagramme chaleur total entrante en fonction de la température de la source chaude pour différents gaz [20].....	66
Figure 54: Propagation de la chaleur dans l'air [23].....	67
Figure 55: Carte d'irradiation du monde.....	77
Figure 56: Carte d'irradiation moyenne du Maroc et principaux sites.....	78
Figure 57: System advisor modele SAM.....	79
Figure 58: Illustration du processus de fonctionnement du logiciel SAM.....	79
Figure 59: Processus de Simulation.....	80
Figure 60: Images de quelques paramètres du système SAM.....	80
Figure 61: Interface de sélection d'entrée.....	81
Figure 62 : Emplacement sur la carte des villes de Tonopah et Ouarzazate.....	82
Figure 63 : Paramètres climatiques sur SAM.....	83
Figure 64: Paramètres SAM du champ solaire.....	84
Figure 65: Paramètres SAM du concentrateur.....	85
Figure 66: Balance d'énergie dans le récepteur d'un système Dish-Stirling.....	85
Figure 67: Paramètres SAM du récepteur.....	86
Figure 68: Paramètres SAM du moteur.....	87
Figure 69: Paramètres SAM des parasites.....	88
Figure 70: Paramètres SAM des couts d'installation.....	89
Figure 72: Système SES.....	90
Figure 71: Système WGA.....	90
Figure 73: Rendement du système Dish-Stirling [27].....	92
Figure 74: Flux Annuel d'énergie pour chaque composant du système.....	92
Figure 75: Diagramme des pertes de puissance.....	93
Figure 76 : effet de la localisation donc DNI sur l'efficacité du système et du cout LCOE.....	94
Figure 77 : Efficacité du système et du moteur en fonction de la surface totale du miroir.....	95
Figure 78 : Pertes au niveau du moteur et du récepteur en fonction de la surface totale du miroir.....	95
Figure 79: Sortie annuel d'énergie et facteur de capacité annuel en fonction de la réflectivité.....	96
Figure 80: Pertes du moteur et du récepteur sur 24h pour un diamètre de 0.2m.....	97
Figure 81: pertes du moteur et du récepteur sur 24h pour un diamètre de 0.02m.....	97
Figure 82: Pertes du moteur pour différentes valeurs de diamètres d'ouverture.....	98
Figure 83: Efficacité du récepteur sur 24h pour différentes valeurs de diamètre d'ouverture.....	98
Figure 84: Influence de l'efficacité du refroidissement et du radiateur sur l'efficacité du système.....	100
Figure 85: Influence de l'efficacité du refroidissement et du radiateur sur l'énergie annuel produite.....	100
Figure 86: Coûts par watt pour chaque composant du système WGA.....	102
Figure 87: Coûts par watt pour chaque composant d'un système photovoltaïque.....	102
Figure 88: Variation de l'énergie annuelle le facteur de capacité et le LCOE par la variation du diamètre d'ouverture du récepteur.....	103
Figure 89 : Comparaison des coûts du système Dish-Stirling [28].....	104

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Dates clés</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 : Statut Masen.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 : Les caractéristiques énergétiques des 5 centrales thermo solaires.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 4 : principales caractéristiques des systèmes de conversion solaire-électrique.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 5 : Influence des caractéristiques de la matrice du régénérateur.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 6 : Différents gaz et leurs propriétés.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 7 : Avantages et inconvénients du moteur Stirling.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 8 : Comparaison des caractéristiques climatiques des villes de Tonopah et Ouarzazate</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 9 : Caractéristiques techniques des deux systèmes Dish-Stirling SES et WGA.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 10: Influence de la réflectivité sur les différentes valeurs du système.....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 11: Influence de l'absorption sur différentes valeurs du système.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 12: Influence des dimensions de la cavité sur différents valeurs du système.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 13: Coûts des systèmes SES et WGA.....</i>	<i>101</i>

Liste des symboles :

Q	Energie thermique, exprimée en Joules
V	Volume exprimé en mètres cubes.
T	Température exprimée en Kelvin.
W	Travail exprimé en Joule.
P	Pression exprimée en Newton par m ²
Et	Efficacité thermique du moteur Stirling.
T ₁	Température du gaz de travail dans l'espace froid
Tr	Température du gaz de travail contenu dans le régénérateur
T ₃	Température du gaz de travail dans l'espace chaud
V _{Mc}	Volume mort chaud (réchauffeur, liaisons, cylindre)
V _{Mf}	Volume mort froid (refroidisseur, liaisons, cylindre)
V _{Mr}	Volume mort du régénérateur.
V _D	Volume balayé par le déplaceur
V _p	Volume balayé par le piston de travail
k	Conductivité thermique
ρ	Densité
C	Capacité thermique
C _p	Capacité thermique à Pression constante
C _v	Capacité thermique à Volume constant
μ	Viscosité
P _{in, rec}	Puissance radiative intercepté par le récepteur
A _{proj}	Surface projetée du miroir
φ _{int, fac}	Facteur d'interception
ρ _{ref}	Réflectivité du miroir
φ _{shade}	Facteur d'ombrage
A _{app}	Air de l'ouverture du concentrateur
A _{rec}	Air de l'ouverture du récepteur
E	Fraction de la superficie de l'ouverture du concentrateur non ombragé par le récepteur
F	Conductance radiatif équivalente
I _{b, n}	Faisceau du rayonnement solaire normal (insolation)
Q _{useful}	Quantité de chaleur provenant du récepteur
T _{amb}	Température ambiante
T _{rec}	Température de fonctionnement du récepteur
U	Coefficient de convection-conduction
A	Coefficient d'absorption du récepteur
τ	Transmittance
θ _i	L'angle d'incidence
σ	Constante de Stefan-Boltzmann de transfert d'énergie par rayonnement
Φ	Proportion de capture ou d'interception
η _c	Rendement du concentrateur
η _R	Rendement du récepteur
η _{Stir}	Rendement du moteur Stirling
η _{Gen}	Rendement du générateur

β_{carnot}	Rapport entre le rendement réelle du moteur et le rendement du cycle de Carnot
TH	Température d'entrée de la chaleur (température absolue)
TL	Température de rejet de la chaleur (également température absolue).

Liste des abréviations:

MASEN: Moroccan agency for Solar Energy

CSP: Concentrated Solar Power

PV : Photovoltaïque

TEP : Tonne Equivalent Pétrole

EDF : Électricité de France

SBP : Schlaich Bergemann und Partner

LATEP : Laboratoire de thermique énergétique et procédés

SAM: System Advisor Model

NERL: National Renewable Energy Laboratory

SES: Stirling Energy Systems

WGA: WG Associates

Introduction :

Le Maroc importe environ 95% de ses besoins en énergie pour faire face à la demande qui s'accroît régulièrement pour accompagner le développement économique du pays. En effet, le Maroc n'est pas producteur d'énergies d'origine fossile (pétrole, gaz). Depuis quelques décennies, les énergies renouvelables se développent au niveau international et certaines atteignent une maturité qui leur permet d'être compétitives comme l'énergie éolienne, le solaire photovoltaïque et les certaines technologies solaires thermiques tel le cylindro-parabolique ou la tour solaire.

L'exploitation des technologies solaires permettra au Maroc de réduire la dépendance énergétique, de réduire les couts d'électricité et de relever les défis énergétiques et environnementaux que représentent l'épuisement des énergies fossiles et le danger qu'elles constituent pour l'environnement. Pour ce faire, le Maroc a mis en place le plan solaire intégré marocain qui vise le développement d'une capacité minimale de 2000 MW à l'horizon 2020.

MASEN (Moroccan Agency For Solar Energy) a été créée pour la mise en œuvre du plan solaire marocain lancé par sa majesté le Roi MOHAMMED VI le 2 novembre 2009 à Ouarzazate. Elle est chargée de mener à bien ce projet en réalisant 5 centrales solaires qui seront localisées dans différentes régions potentielles et à travers la mise en place et l'étude technique du programme de projets intégrés de production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

C'est dans ce contexte qu'intervient cette étude. En effet, la technologie Dish-Stirling est l'une des technologies CSP développées actuellement et objet de récents projets industriels et de recherches. Cette technologie relativement récente mérite d'être étudiée en détails, afin de connaître ses forces, ses limites et définir ses domaines d'application pertinents. Dans le cadre de mon PFE, je suis chargée d'étudier la technologie Dish-Stirling dans l'objectif de mieux comprendre la technologie afin de la positionner par rapports aux autres technologies solaire d'un point de vue technique et économique pour ensuite déboucher sur une analyse prospective des potentialités de développement de la technologie Dish-Stirling au Maroc .

Le rapport présente dans un premier temps le profil de la société MASEN, l'organisation et les objectifs du département de conception technique auxquels je suis attachée tout le long de mon stage.

Dans un deuxième temps, les technologies de production d'électricité à partir d'énergie solaire feront l'objet d'une présentation sommaire.

Ensuite, le cœur du rapport détaillera, en premier lieu, la technologie Dish-Stirling en parallèle d'une comparaison entre le Dish-Stirling et les autres technologies solaires. L'étude se fera sur les différentes parties d'une centrale Dish-Stirling à savoir le concentrateur (Dish), le système de suivi du soleil, le récepteur et le moteur Stirling. Ce dernier sera encore plus détaillé dans un chapitre suivant.

En deuxième lieu, après une brève étude des performances, une simulation sera faite au final pour aboutir sur une conclusion globale et permettre au lecteur de ce rapport d'avoir une idée précise sur les potentialités de développement de cette technologie.

Chapitre 1 : **Présentation de la société**

I. Présentation du plan solaire marocain :

Ouarzazate, 02/11/09- SM le Roi Mohammed VI, accompagné de SAR le Prince Moulay Rachid, a présidé, lundi au palais des congrès à Ouarzazate, la cérémonie de présentation du projet marocain de l'énergie solaire, d'un coût d'investissement estimé à 9 milliards de dollars. Ce projet national, ambitieux et réaliste vise la mise en place en 2020 d'une capacité de 2.000 mégawatts. Cette capacité va représenter 14% de la puissance électrique à l'horizon 2020.

Cinq sites ont été identifiés pour le lancement de ce projet, qui s'inscrit dans le cadre de la stratégie énergétique tracée conformément aux Hautes Directives du Souverain. Il s'agit des sites de Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Foum Al Oued, Boujdour et Sebkhate Tah.

Ce projet d'envergure internationale permettra d'assurer une capacité de production annuelle de 4500 GW.

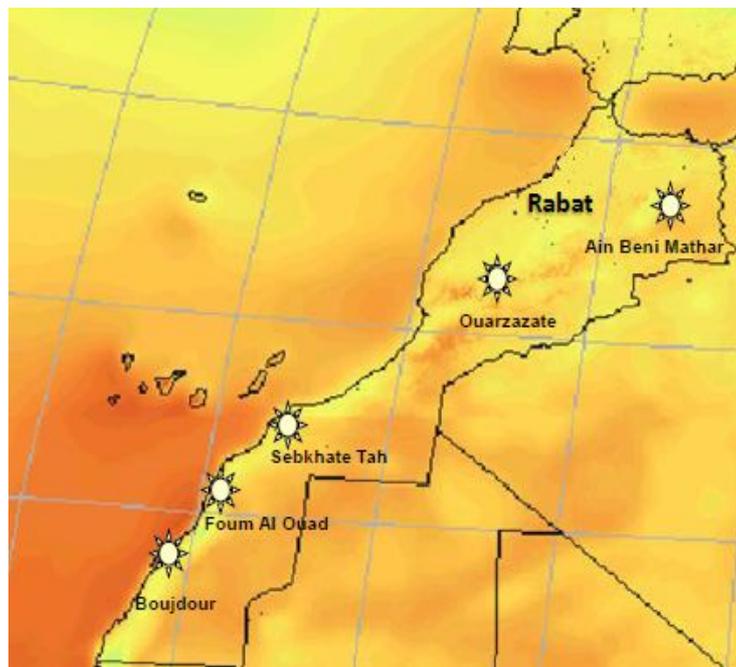


Figure 1 : Sites du projet

Le projet sera achevé vers la fin de l'année 2019 et la date de mise en service de la première centrale a été fixée à 2015,

Grâce à la mise en valeur du potentiel solaire, le projet contribuera à la réduction de la dépendance énergétique, à la préservation de l'environnement, par la limitation des émissions des gaz à effet de serre et à la lutte contre les changements climatiques.

A terme, il permettra annuellement d'économiser en combustibles 1 million de tonne équivalent pétrole (TEP) et d'éviter l'émission de 3,7 millions de tonnes de CO2.

Le projet marocain de l'énergie solaire est en phase avec la tendance internationale, qui, face à une demande énergétique croissante et au défi du réchauffement climatique, place les énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire au rang des priorités.

Outre la production électrique, ce projet inclut la formation, l'expertise technique, la recherche développement, la promotion d'une industrie solaire intégrée et potentiellement le dessalement de l'eau de mer.

Ce projet d'envergure se construira autour de partenariats publics et privés ciblés et équilibrés avec des acteurs de référence. Sa mise en œuvre sera confiée à une agence marocaine pour l'énergie solaire (Moroccan Agency for Solar Energy).

1. Les grands axes de la politique énergétique du Maroc :

- ✓ Le renforcement de la sécurité d'approvisionnement en énergies à travers la diversification des sources et ressources, l'optimisation du bilan énergétique et la maîtrise de la planification des capacités.
- ✓ L'accès généralisé à l'énergie, par la disponibilité d'une énergie moderne pour toutes les couches de la population et à des prix compétitifs.
- ✓ Le développement durable par la promotion des énergies renouvelables, pour le renforcement de la compétitivité des secteurs productifs du pays, la préservation de l'environnement par le recours aux technologies énergétiques propres, en vue de la limitation des émissions des gaz à effets de serre et la réduction de la forte pression exercée sur le couvert forestier.
- ✓ Le renforcement de l'intégration régionale à travers l'ouverture aux marchés euro méditerranéens de l'énergie et l'harmonisation des législations et des réglementations énergétiques.

2. Dates clés :

Novembre 09	Présentation du projet marocain de l'énergie solaire à Ouarzazate
Janvier 2010	Création de Masen
30 mars 2010	Lancement de L'Appel à Manifestation d'intérêt pour Ouarzazate
24 mai 2010	Date limite de l'AMI
Fin 2010	Lancement de l' Appel d'Offres auprès des pré-qualifiés pour le développement de la première centrale
2015	Livraison de la première centrale 500 MW
2020	Production de 2000 MW

Tableau 1 : Dates clés

II. Présentation générale de la société :

1. Présentation de MASEN :

«**Moroccan Agency for Solar Energy**» par abréviation « **MASEN** » est une société anonyme à directoire et à conseil de surveillance dont la création est effective depuis mars 2010. MASEN a été dédiée pour le plan solaire marocain lancé par sa majesté le Roi MOHAMMED VI le 2 novembre 2009 à Ouarzazate.

Cette société est chargée de réaliser 5 centrales solaires qui seront localisées dans différentes régions potentielles étant : **Ouarzazate, Ain Beni Mathar, Sebkhate Tah, Foum El Oued et Boujdour** et dont le coût d'investissement global est de 70 milliards de dirhams.

MASEN a pour objectif la réalisation du programme intégré d'énergie solaire soit **2000 MW** à l'horizon **2020** et cela à travers la mise en place du programme de projets intégrés de production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Il revient donc à MASEN de piloter le projet solaire dans sa globalité, des études techniques au suivi après la mise en fonction, en passant par le choix des opérateurs.

En 2020, la puissance électrique installée en énergies renouvelables (hydraulique, éolienne et solaire) représentera **42%** du parc énergétique dont **14%** de l'énergie solaire.

2. Statut de MASEN :

Raison sociale	MASEN
Forme juridique	Société Anonyme à Directoire et à Conseil de Surveillance.
Création de MASEN	Mars 2010.
Les principaux actionnaires :	L'état marocain, le fonds HASSAN II, l'office national d'électricité et la société d'investissements énergétiques.
Activité :	Développement de projets intégrés de production d'électricité et d'énergie solaire
Capital social	500 millions de dirhams.
Effectif	46 en 2013.
Adresse	Avenue Al Araar, Immeuble extension CMR, 3ème étage, Hay Riad, Rabat - MAROC.
Tél.	+212 (0)537 57 45 50 / +212 (0)537 57 46 30.
Site Web	www.masen.ma

Tableau 2: Statut Masen

3. Organigramme de MASEN :

L'organigramme de l'agence marocaine est représenté ci-dessous :

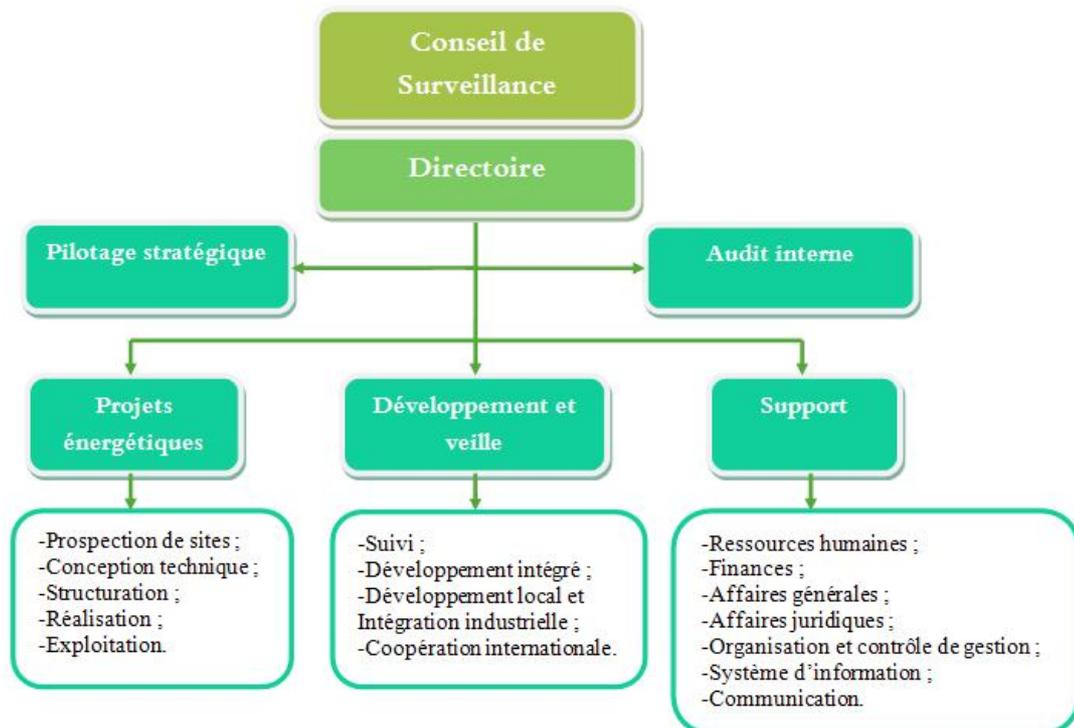


Figure 2: Organigramme de MASEN

4. Les projets de MASEN :

Les projets réalisés par MASEN sont établis sur 5 sites :

Le complexe solaire d'Ouarzazate est la première centrale solaire lancée du projet solaire.

La première phase du complexe solaire d'Ouarzazate est une centrale thermo-solaire d'une puissance comprise entre 125 et 160MW et d'une surface de 450 ha et elle sera mise en service en 2014.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques énergétiques de différentes centrales thermo-solaires projetées suivant les informations du ministère de l'énergie : (Source : Ministère de l'énergie et des mines, le 2 novembre 2009).

	CSP		Photovoltaïque		Puissance (MW)
	Radiation solaire (KWh/m ² /an)	Production annuelle (GWh)	Radiation solaire (KWh/m ² /an)	Production annuelle (GWh)	
Ain Beni Mathar	2290	833	2208	795	400
Foum Al Oud	2635	1150	2300	1035	500
Boujdour	2642	230	2285	206	100
Sebkhat Tah	2140	1150	2095	1033	500
Ouarzazate	2628	1150	2235	1006	500

Tableau 3: Les caractéristiques énergétiques des 5 centrales thermo solaires.

Chapitre 2 :
Le solaire thermique
concentré

I. Les technologies solaires

Il existe deux types de technologies de production d'électricité à partir de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque (PV) : la cellule photovoltaïque, composé d'un matériau semi-conducteur, produit par effet photoélectrique un courant continu injecté dans le réseau électrique après transformation du signal par des onduleurs.
- Le solaire thermique à concentration (CSP) : 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), puis en électricité grâce à des alternateurs.

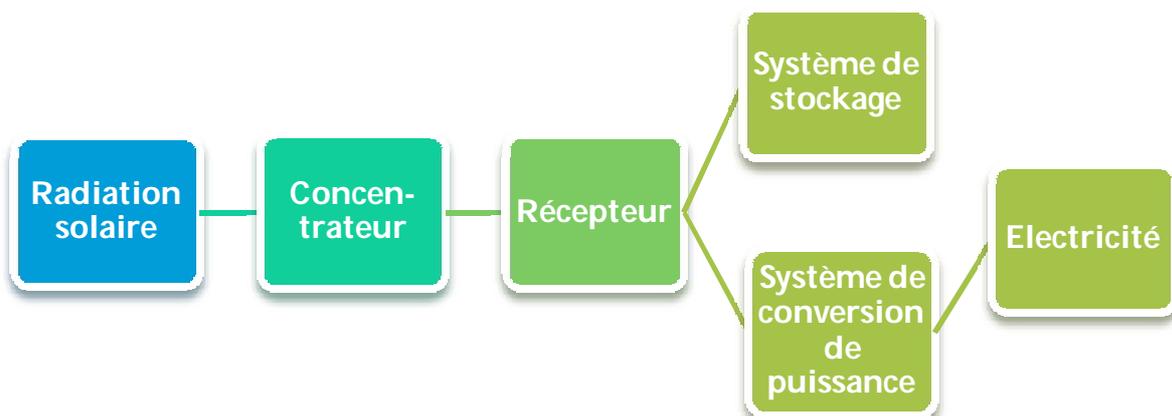
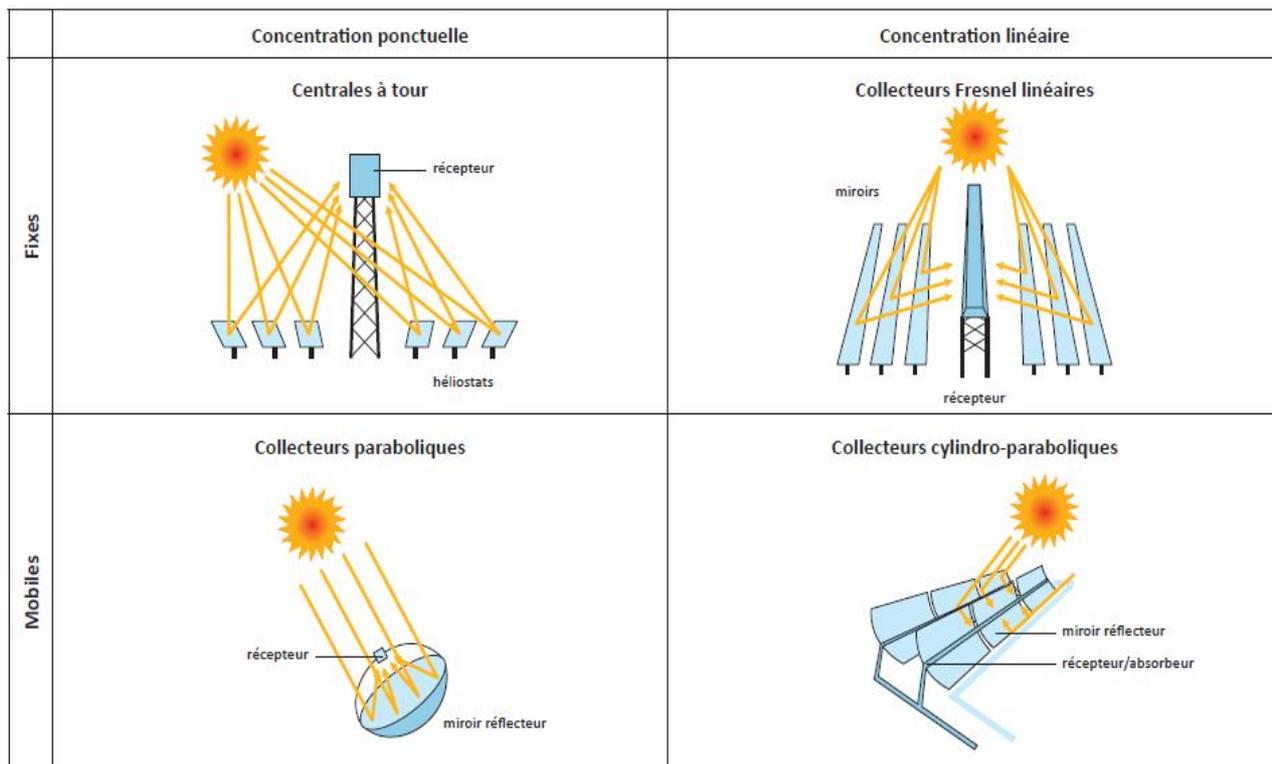


Figure 3 : Schéma de principe du CSP

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

Figure 4 : Schéma résumant le principe des 4 technologies [1]

L'énergie solaire est, comme son nom l'indique, une technologie qui permet de produire de l'électricité pendant la journée (présence du soleil). Or les besoins en énergie électriques sont repartis sur 24 heures d'où un besoin de stocker une partie de l'énergie solaire produite pour l'utilisation pendant la nuit en fonction des besoins des utilisateurs.

Les deux technologies CSP et PV connaissent le problème de stockage d'énergie mais certaines technologies CSP imaginent actuellement différentes solutions de stockage de la chaleur produite (dans de la roche, des sels fondus, etc.) avant sa transformation en électricité.

II. Concentration Linéaire

1. Centrale cylindro-parabolique

Ces centrales solaires utilisent des miroirs de forme cylindro-parabolique qui concentrent les rayons du soleil vers un tube absorbeur sous vide situé sur l'axe focal où circule un fluide caloporteur (Figure ci contre). Ce fluide, en général une huile de synthèse, est chauffée à des températures d'environ 400° C.

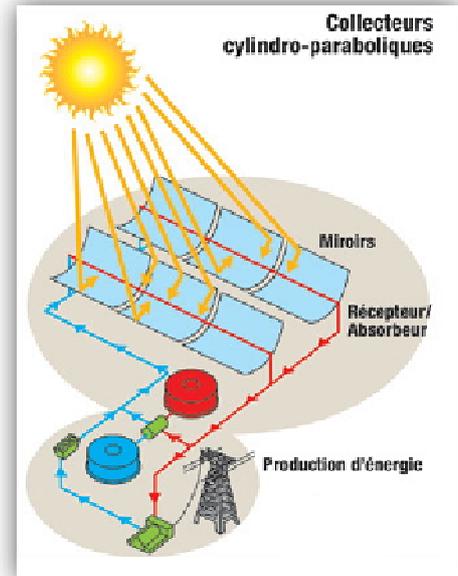


Figure 5 : Schéma de principe de la centrale cylindro-parabolique [EDF]

L'huile synthétique chauffée circule à travers une série d'échangeurs de chaleur permettant la vaporisation du fluide de travail (l'eau) pour produire de la vapeur surchauffée à la température de 390°C sous une pression de 100 bars. C'est le traditionnel cycle de Rankine. L'eau sous pression qui s'est vaporisé dans l'évaporateur est injectée dans une turbine. La vapeur est ensuite détendue dans la turbine, condensée et comprimée puis renvoyée dans l'évaporateur :

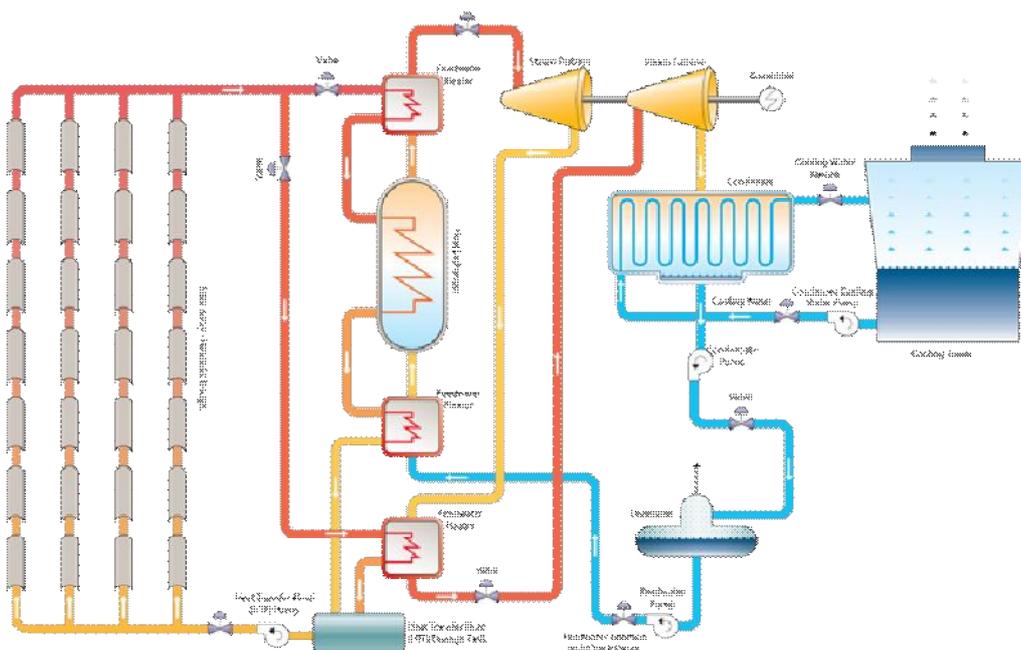


Figure 6: Principe de fonctionnement d'une centrale à capteur cylindro-parabolique à huile avec stockage à sel fondu et cycle de Rankine [2]

- Capacité aujourd'hui : 10 à 80 MW
- Technologie la plus mature, démontrée à l'échelle industrielle
- Exploitation commerciale depuis 1984
- Offre des possibilités de stockage
- Technologie privilégiée pour les nouvelles centrales aux États-Unis, en Europe et en Afrique du Nord.
- Plus de 30 centrales en construction en Espagne
- Centrales en fonctionnement en Europe :
Andasol 1 (50 MW + stockage 7h30) Grenade, Espagne
Puertollano (50 MW) Ciudad Real, Espagne
Alvarado (50 MW) Badajoz, Espagne .[1][2][3]



Figure 7: Centrale cylindro-parabolique [2]

2. Centrale à miroir Fresnel

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. Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs qui joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur redirige le rayonnement vers ce dernier.

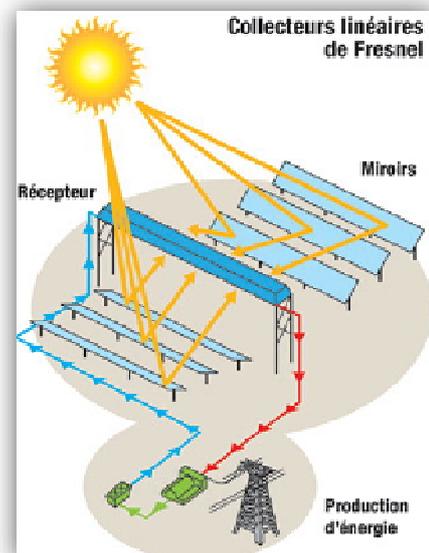


Figure 8: Schéma de principe de la centrale à miroirs Fresnel [EDF]

Le principe de génération d'électricité est similaire à celui des centrales cylindro-parabolique mais dans les centrales à miroirs de Fresnel, on utilise l'eau comme fluide

caloporteur et fluide de travail. La génération de vapeur est donc directe comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous .Les températures ne dépassent pas les 300°C.[2][5]

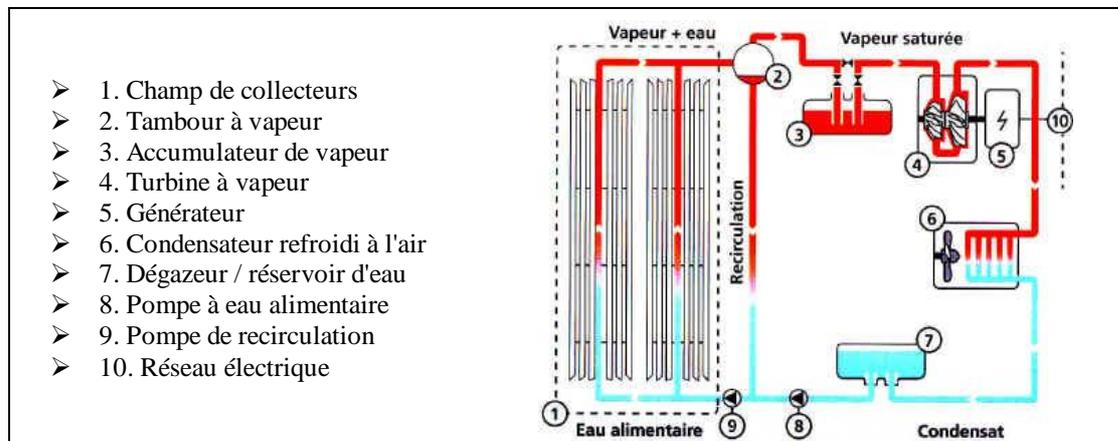


Figure 9 : Schéma de principe d'une centrale avec récepteurs Fresnel

On utilise aussi dans le Fresnel, le cycle de Rankine organique. A la différence du cycle de Rankine à vapeur, le cycle de Rankine organique utilise un fluide possédant un point d'ébullition plus bas et présentant un rendement supérieur à basse température. Il présente l'avantage d'être très simple, tous ses éléments étant très répandus et relativement bon marché.

- Projets de démonstration en cours jusqu'à 6 MW
- De grandes centrales sont en cours de développement (jusqu'à 150 MW)
- 2 centrales de présérie (USA, technologie australienne, et Espagne, technologie allemande)
- Solution choisie pour une première centrale française
- Possibilité de Stockage.[1][2][3]



Figure 10: Centrale à miroirs Fresnel

III. Concentration ponctuel

1. Centrale à tour solaire

Les centrales solaires à tour utilisent de grands miroirs (héliostats) de plus de 100m² qui sont presque plats, suivent le soleil et concentrent ses rayons sur un récepteur au sommet d'une tour. Deux technologies : la production directe de vapeur ou l'utilisation de sels fondus pouvant être utilisés comme fluide caloporteur et milieu de stockage thermique. Les hautes températures atteintes dans les tours solaires peuvent être utilisées pour alimenter un cycle de Rankine. [4][6]

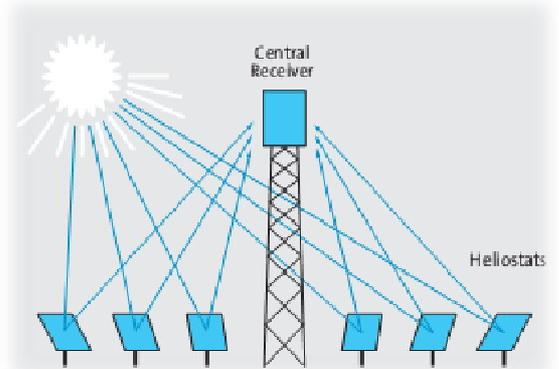


Figure 11 Schéma de principe d'une centrale à tour solaire[4]

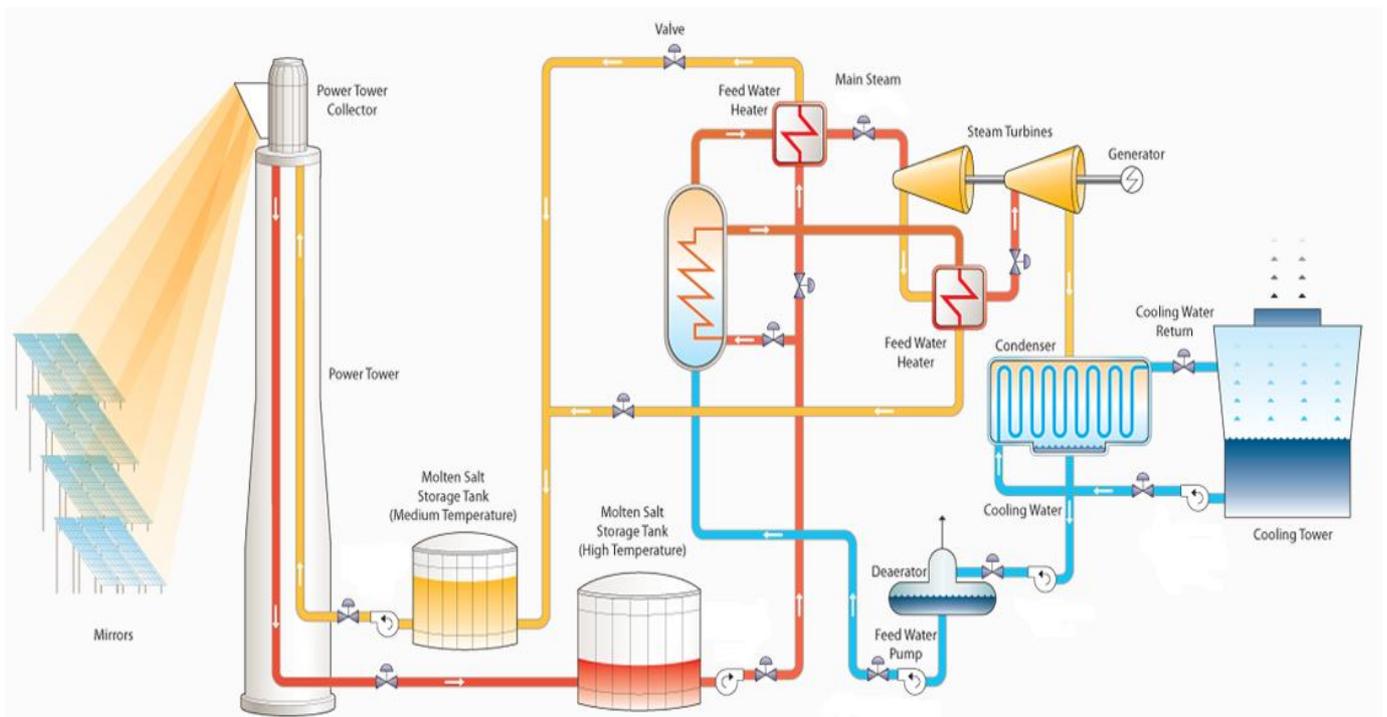


Figure 12: Principe de fonctionnement d'une centrale à tour [6]

- Capacité : 10 à 50 MW
- Démonstration dans les années 1980
- Commercialement prouvé
- Offre des capacités de stockage
- Commercialisation : 2 centrales en Espagne (10 MW et 20 MW) et une autre en construction (17 MW + stockage 15h)
- Projets de capacité supérieure annoncés aux États-Unis
- Centrales en fonctionnement en Europe : Solucar PS10 et PS20 (10 MW + 20 MW) Séville, Espagne



Figure 13: Tour solaire à Séville

2. Centrale Dish-Stirling

La technologie du Dish Stirling consiste en un système constitué d'un concentrateur solaire en forme de parabole qui suit le soleil tout au long de la journée et concentre la radiation sur l'unité d'absorption de chaleur du moteur Stirling, placé au point focal de la parabole. L'énergie solaire thermique ainsi concentrée est transformée en électricité directement injectable sur le réseau. [6]

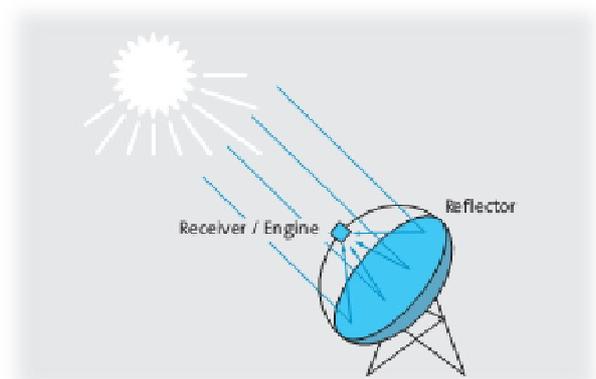


Figure 14 : Schéma de principe d'une centrale Dish-Stirling [4]



Figure 15: Installations de Dish-Stirling [3]

- Capacité : 10 kW à 25 kW par unité
- Plusieurs installations de petite taille sont déjà opérationnelles. Des unités à l'échelle industrielle sont planifiées mais pas encore commercialisés.[1][2][3]

IV. Centrale à cheminée

Une cheminée est une centrale construite de manière à canaliser l'air chauffé par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité ; De l'air est chauffé par effet de serre au niveau d'une plaine, et conduit par une cheminée qui débouche en altitude, permettant ainsi de tirer profit de la différence de température et de l'énergie potentielle de convection disponible. À la base de la cheminée se trouvent des turbines entraînant des générateurs électriques permettant de produire de l'électricité.

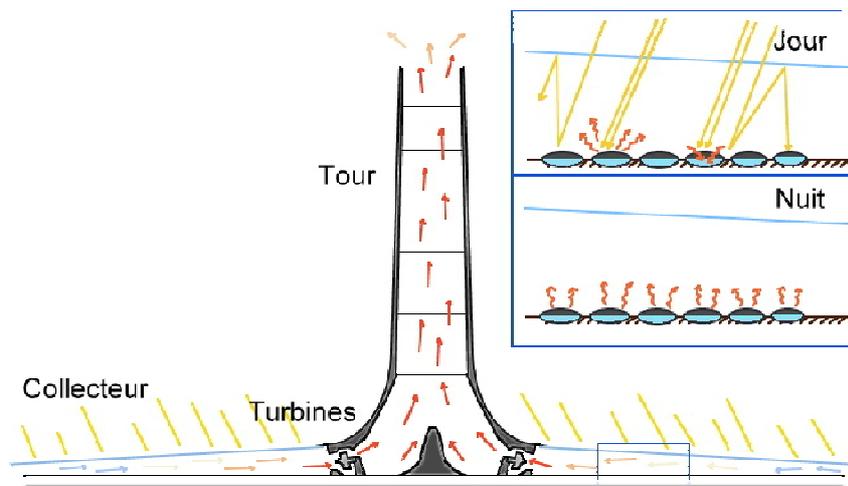


Figure 16 : Schéma de principe d'une centrale à cheminée

Un Prototype de cheminée solaire est implanté à Manzanares, en Espagne construite en 1982. Le prototype a fonctionné pendant 7 ans. Ce prototype a été arrêté car le coût du kilowattheure n'était pas compétitif (cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique). Les constructions actuelles sont des installations de recherche et de démonstration qui doivent servir de base pour le développement d'une technologie d'avenir. [4]



Figure 17: Prototype de cheminée solaire à Manzanares [2]

Chapitre 3 :
État de l'art de la technologie
Dish-Stirling

I. Description du système :

Le système Dish-Stirling se compose essentiellement des éléments suivant :

- Un concentrateur parabolique
- Un système de poursuite du soleil
- Un récepteur
- Un moteur Stirling couplé à un générateur électrique

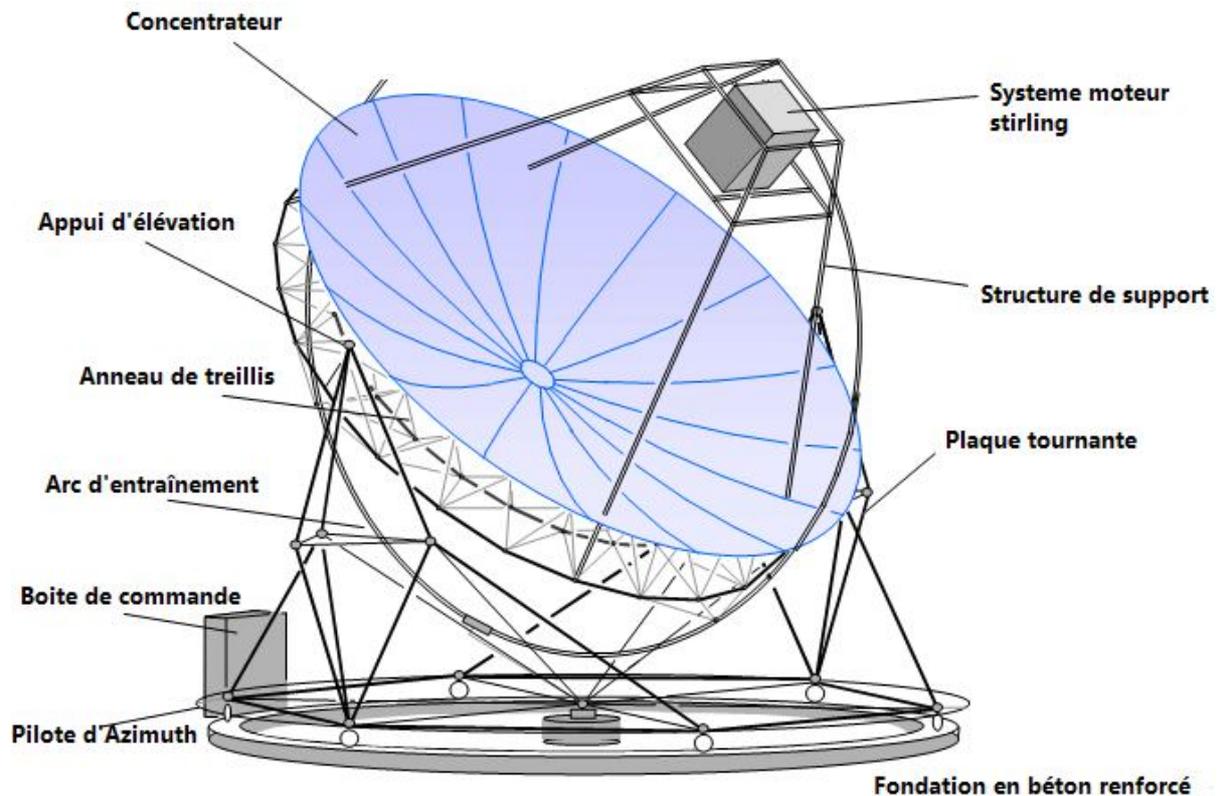


Figure 18: Schéma décrivant le système Dish-Stirling [7]

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. Un générateur électrique directement lié au vilebrequin du moteur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (AC).

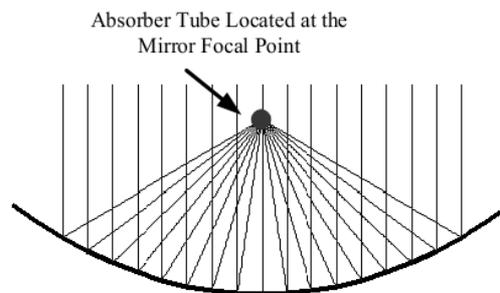
Pour maintenir constamment le rayonnement réfléchi au point focal au cours de la journée, un système de suivi du soleil (tracker) tourne le concentrateur solaire en permanence autour de deux axes afin de suivre le déplacement du soleil. La sortie électrique du système est

proportionnelle à la taille du réflecteur, aux pertes optiques et à l'efficacité du moteur Stirling et du générateur.

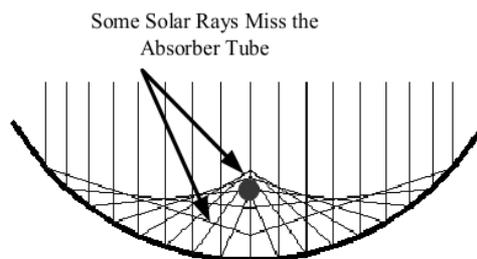
II. Concentrateur et système de poursuite du soleil

1. Miroirs et concentration :

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 celle de la parabole (Figure 20) ; tous les rayons incidents parallèles à l'axe principal se focalisent au foyer dans lequel on peut placer le récepteur :



(a) Reflecting Mirror with Ideal Parabolic Cross Section



(b) Reflecting Mirror with Non-ideal Cross Section (Circular)

Figure 19 : (a) Rayons réfléchis par un miroir parabolique (b) Rayons réfléchis par un miroir sphérique [14]

La fabrication de miroirs paraboliques est un processus fort complexe ce qui rend les coûts de production élevés, les concentrateurs représentant jusqu'à 40% des coûts totaux du système pour les technologies CSP. Afin de réduire ces coûts, la forme du paraboloïde est approximé par un ensemble de miroirs plans ou sphériques car la parabole peut être bien approximé sur de petites sections (Figure 20). Certains concentrateurs utilisent plusieurs miroirs en forme

sphérique pris en charge par une structure en treillis (Figure 21), chaque facette est individuellement orientée. Cette approche de la conception du concentrateur permet une très haute précision de concentration. Une autre innovation concerne l'utilisation de membranes tendues ; une membrane mince réfléchissante est tendue sur un bord ou un cerceau. Une seconde membrane est utilisée pour obturer l'espace situé derrière. Un vide partiel est établi dans cet espace, ce qui donne à la membrane réfléchissante une forme approximativement sphérique. La figure 21 est une vue schématique d'un système Dish-Stirling qui utilise ce concept.

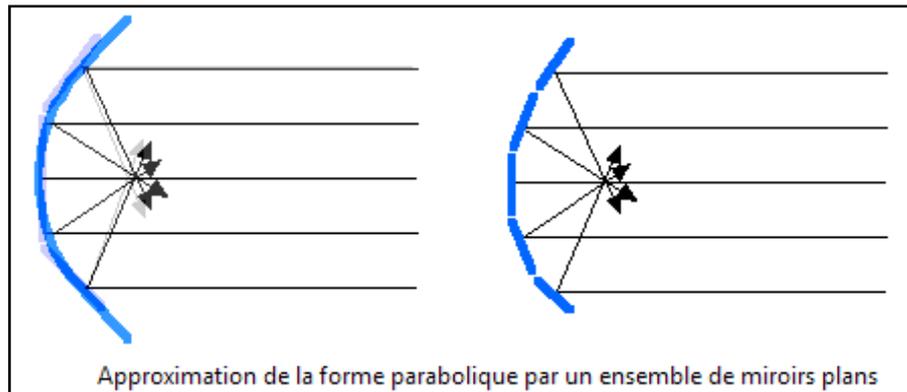


Figure 20: Approximation de la forme parabolique par un ensemble de miroirs plans

Les recherches sont actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer les propriétés physiques des matériaux réflecteurs, (réflectivité, résistance aux chocs, etc.) Les concentrateurs utilisent des surfaces réfléchissantes en aluminium ou en argent, déposée soit sur la face avant ou arrière du verre ou du plastique. Les miroirs à verre mince avec une surface de dos argentés ont été utilisés dans le passé. Certains modèles actuels utilisent des films minces de polymère d'aluminium ou d'argent déposées sur la face avant ou face arrière du film. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

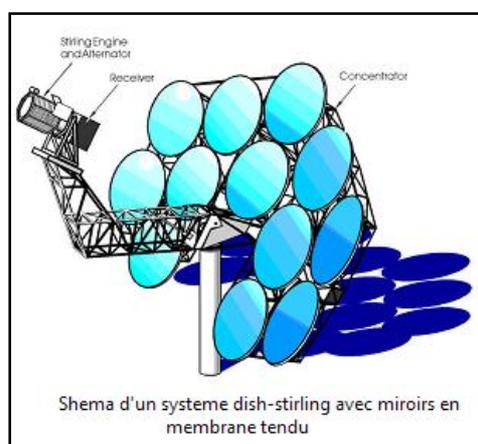


Figure 21: Dish-Stirling avec concentrateur à membranes tendus [26]

Pour le fonctionnement du Moteur Stirling, des températures aussi élevés 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/m^2 .

Cependant, le concentrateur doit suivre le mouvement du soleil dans le ciel car un miroir parabolique n'est pas symétrique par rapport à la rotation autour de son point focal au contraire d'un miroir sphérique. Comme le montre la Figure suivante, si le faisceau incident des rayons parallèles est légèrement perpendiculaire à l'ouverture miroir (1° dans cet exemple), la dispersion du faisceau se produit, ce qui entraîne la diffusion de l'image au niveau du point focal. Pour un miroir parabolique, afin de concentrer fortement, il doit suivre avec précision le mouvement du soleil pour maintenir l'axe (ou un plan) de symétrie parallèle aux rayons incidents du soleil.

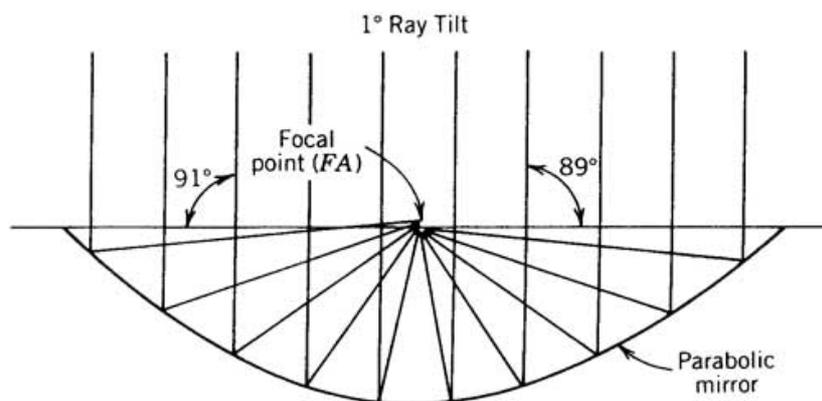


Figure 22 Réflexion d'un faisceau hors axe du miroir parabolique [14]

Ces propriétés optiques et la nécessité de températures aussi élevées que possible pour le bon fonctionnement du moteur Stirling rendent le système de suivi solaire nécessaire.

2. Système de poursuite du soleil

La position du soleil change au fil de la journée (en fonction de la rotation de la Terre) et de la période de l'année (en fonction des variations d'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite du soleil).

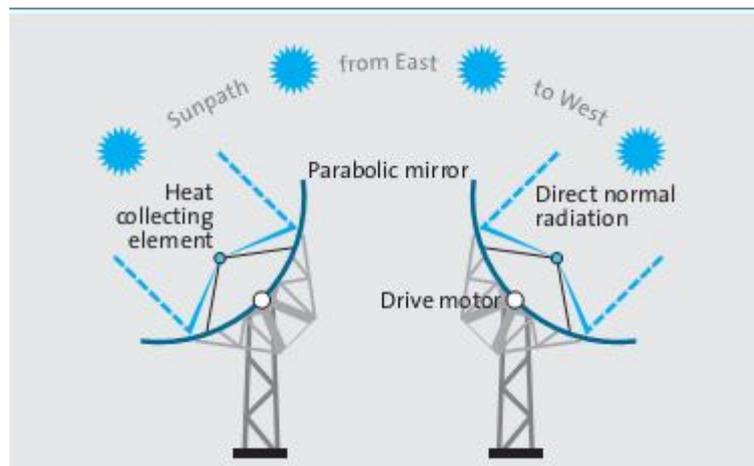


Figure 23: Poursuite du soleil durant une journée [6]

Il existe deux axes de suivi du soleil : l'axe en azimut (selon l'avancée de la journée d'est en ouest) et l'axe en hauteur (selon l'avancée de la journée et la saison). (Pour plus de détail, se référer à l'Annexe 1 : Complément d'information sur la course du soleil)

Afin de suivre le soleil, les concentrateurs doivent être capables de se déplacer autour de ces deux axes selon deux méthodes [12] :

- La première est le suivi en azimut-élévation, dans laquelle la parabole tourne dans un plan parallèle à la terre (azimut) et dans un autre plan perpendiculaire à celui-ci (élévation). Ceci permet au concentrateur des rotations haut / bas et gauche / droite. Le Taux de rotation autour des deux axes varie tout au long de la journée, mais est prévisible.

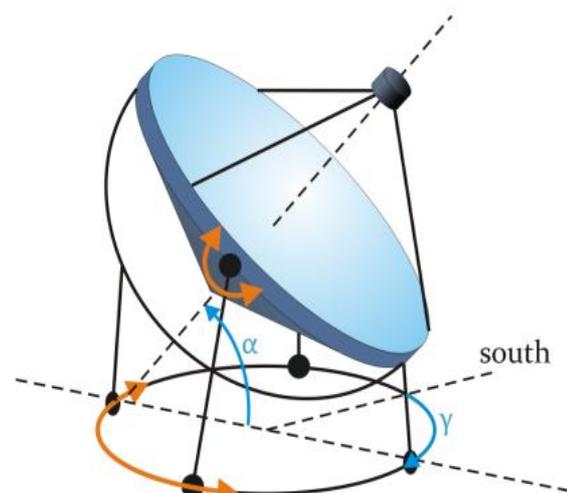


Figure 24: Suivi solaire en azimut-élévation

- La deuxième est la méthode de suivi polaire (polar tracking method): le concentrateur tourne autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation de la terre, à une vitesse constante de 15 degrés par heure, la même que la vitesse de rotation de la terre. L'autre axe de rotation, l'axe de déclinaison, est perpendiculaire à l'axe polaire. Le mouvement autour de cet axe se produit lentement et varie de $\pm 23 \frac{1}{2}$ degrés sur un an (un taux maximum de 0,016 degrés par heure).

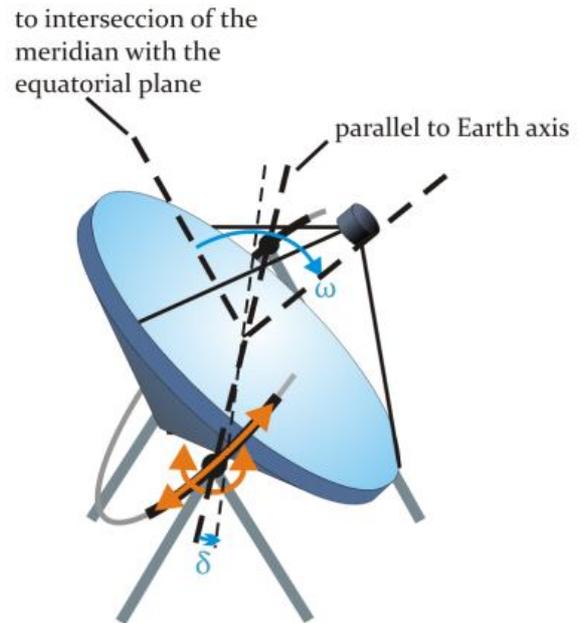


Figure 25: Suivi polaire

Les systèmes de suivi solaire sont généralement classés en deux catégories : les trackers passifs (mécanique) et les trackers actifs (électrique) [12]. Ce sont ces derniers qui sont le plus utilisés, particulièrement pour le Dish-Stirling.

Les trackers actifs utilisent les moteurs et les trains d'engrenages pour se diriger d'après la commande du contrôleur de la direction solaire. Les principaux trackers actifs peuvent être classés en systèmes basés soit sur un microprocesseur et un capteur électro-optique, sur la date et l'heure commandé par PC, sur une cellule solaire auxiliaire biface (panneaux PV) ou sur une combinaison de ces trois systèmes.

- Les capteurs Électro-optiques sont composés d'au moins une paire de photorésistances connectées antiparallèlement.
- Les cellules auxiliaires bifaces détectent et pilotent le système vers la position souhaitée. Ils sont connectés directement à un moteur à courant continu à aimants permanents et sont fixés sur un axe de rotation du suiveur pouvant à la fois détecter et fournir de l'énergie pour suivre le soleil.
- Dans les systèmes basés sur la date et l'heure et les systèmes à microprocesseurs, un ordinateur ou un processeur calcule la position du soleil par rapport à la date, l'heure et les informations géographiques grâce à des algorithmes et crée des signaux pour la commande du système.

III. Récepteur :

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 répartie 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 [15].

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.

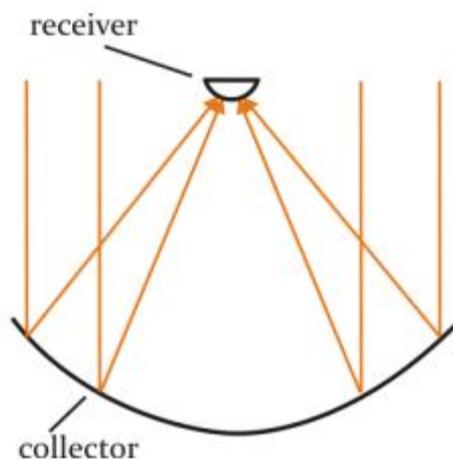


Figure 26: Schémas représentant un récepteur externe [15]

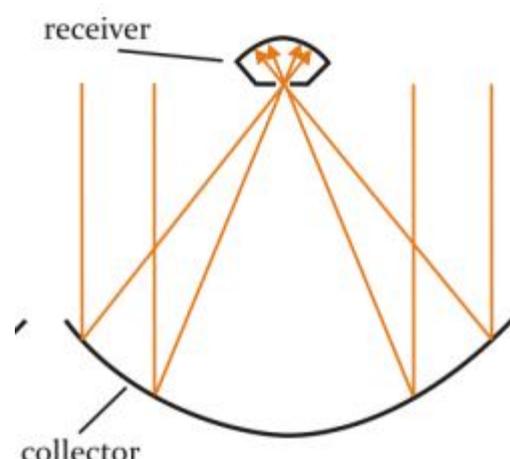


Figure 27: Schémas représentant un récepteur à cavité [15]

Les Récepteurs des systèmes Dish-Stirling sont des récepteurs à cavité possédant une petite ouverture à travers laquelle la lumière du soleil concentrée pénètre. L'absorbeur est placé derrière l'ouverture afin de réduire l'intensité du flux solaire concentré. La cavité isolée placée entre l'ouverture et l'absorbeur permet de réduire la quantité de chaleur perdue. L'ouverture du récepteur est optimisée pour être juste assez grande pour admettre le maximum de rayons concentrés mais assez petit pour limiter le rayonnement et la perte par convection.

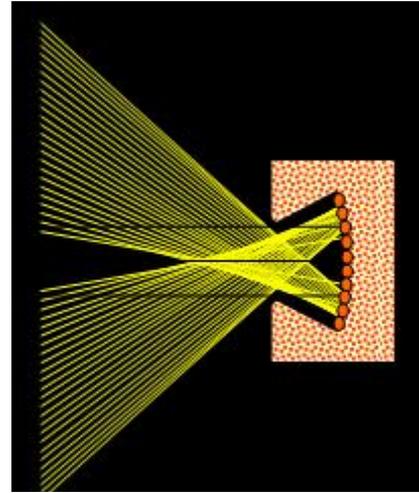


Figure 28 : Récepteur à cavité et rayons réfléchis [15]

En règle générale, le plan de l'ouverture de la cavité est placé près du foyer de la parabole et normal à l'axe de la parabole.

Dans un récepteur à cavité, deux méthodes sont utilisées pour transférer le rayonnement solaire absorbé au gaz de travail du moteur Stirling :

1. Récepteur à tube directement illuminé

Dans le premier type de récepteur, le récepteur à tube directement illuminé (directly illuminated tube receiver) de petits tubes à travers lesquels passe le gaz de travail du moteur sont placés directement dans la région du flux solaire concentré du récepteur (Figure 29) [8]. Les tubes forment la surface de l'absorbeur. Le gaz de travail du moteur Stirling est donc directement chauffé.

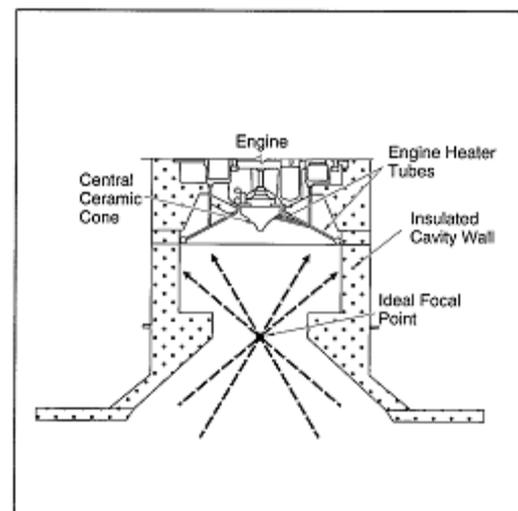


Figure 29 : Schéma d'un récepteur à tubes directement illuminé [8]

2. Récepteur à illumination indirecte :

L'autre type de récepteur utilise un fluide intermédiaire caloporteur en métal liquide (figures 31 et 32). Le métal liquide est vaporisé sur la surface de l'absorbeur et se condense sur les tubes transportant le gaz de travail du moteur. Ce deuxième type de récepteur est appelé un récepteur à reflux (reflux receiver), car les flux de vapeur se condensent et retournent chauffer à nouveau.

Pour les récepteurs dans lesquels le métal liquide est utilisé comme fluide de transfert de chaleur intermédiaire, deux modes d'alimentation de l'absorbeur en métal liquide sont en cours de développement : les pools boilers (littéralement chaudières à baignoires) et des tubes échangeurs à caloduc (heat pipes). Avec la première méthode, un bain de métal liquide est toujours en contact avec la surface d'absorption, comme le montre la figure 32. La deuxième méthode consiste en une mèche fixée à l'arrière de l'absorbeur. Les forces de capillarité dans la mèche tirent le métal liquide vers la surface de l'absorbeur où il se vaporise. Cette méthode est illustrée dans la Figure 31[8].

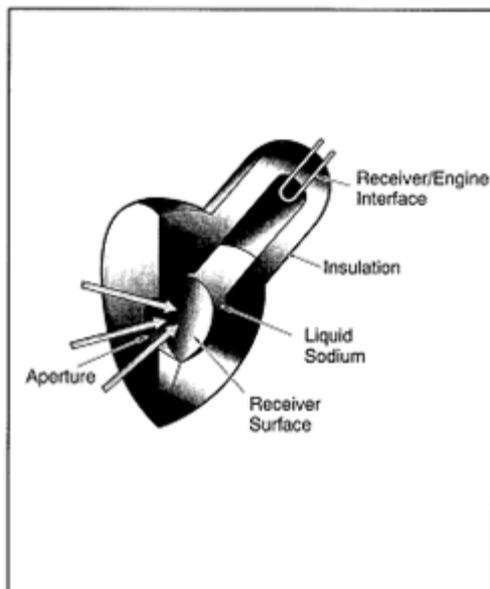


Figure 28: Schéma d'un récepteur Pool boilers [8]

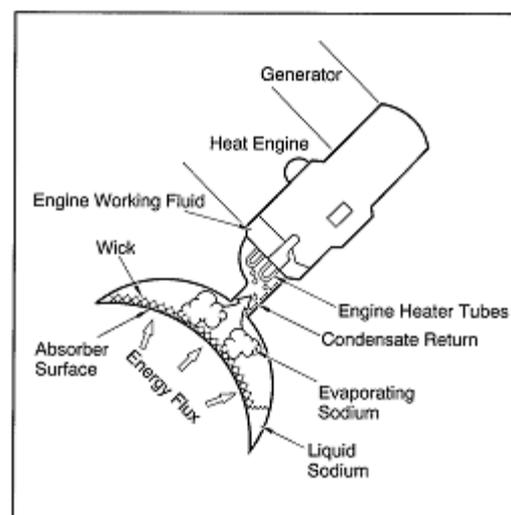


Figure 29: Schéma d'un récepteur à reflux [8]

IV. Moteur Stirling :

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 puis en énergie électrique par le biais d'un alternateur.

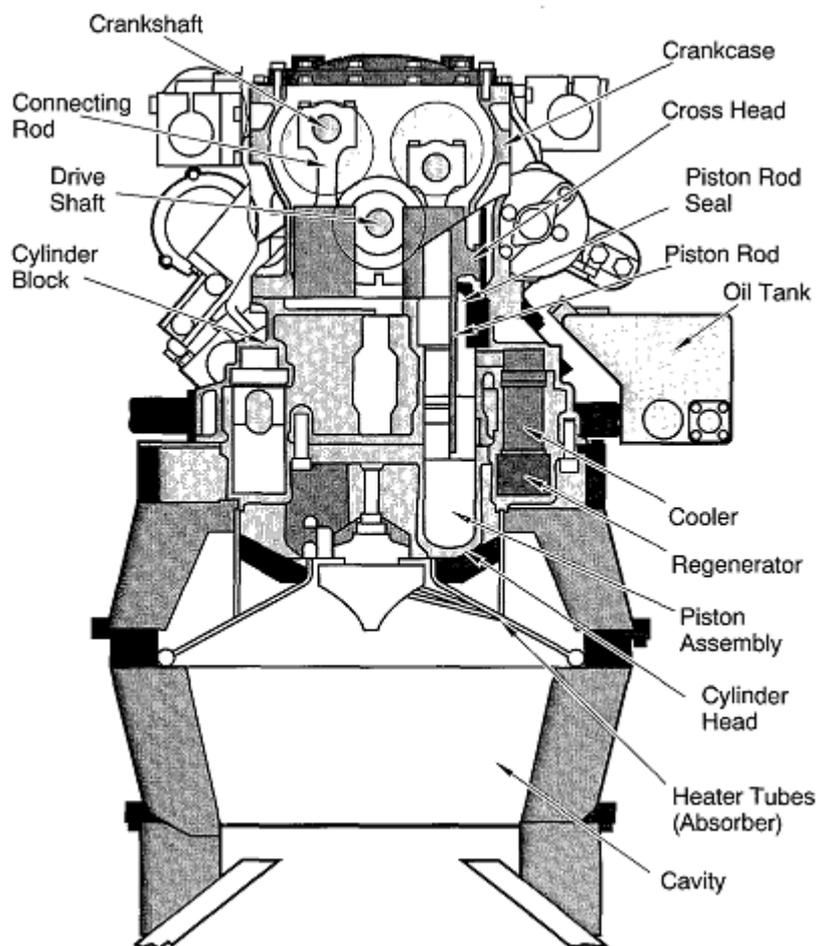


Figure 30: Schéma d'un moteur Stirling cinématique avec récepteur directement illuminé

En théorie, le moteur Stirling est le dispositif le plus efficace pour convertir la chaleur en travail mécanique [19] mais il nécessite des températures élevées. Parce que les concentrateurs paraboliques peuvent produire des températures élevées, le moteur Stirling et le concentrateur solaire parabolique forment un bon dispositif pour la production d'électricité à partir du soleil.

Ceci est dû aux caractéristiques du moteur Stirling. En effet, plus la température de la source chaude augmente, plus la puissance du moteur est grande permettant un coût moins élevé de la production d'électricité. Les températures de fonctionnement vont de 650° à 800°C (1200 à 1470F), résultant en un rendement de conversion de moteur de l'ordre de 30% à 40% .

Ensuite, En raison de leurs capacités de transfert de chaleur élevés, l'hydrogène et l'hélium ont été utilisés comme gaz de travail pour les moteurs Stirling. L'hydrogène, thermiquement meilleur, permet des moteurs plus efficaces. L'Hélium, d'autre part, à moins de problèmes de compatibilité des matériaux et est moins dangereux car non inflammable.

Afin de maximiser la puissance, les moteurs fonctionnent généralement à pression élevée, de l'ordre de 5 à 20 MPa. Le fonctionnement à des pressions de gaz aussi élevées crée des problèmes d'étanchéité. De nouveaux modèles pour réduire ou éliminer ce problème sont actuellement en cours d'élaboration.

Enfin, les systèmes Dish-Stirling sont conçus pour de longue durée de vie. Pour rendre les systèmes économiques, une durée de vie d'au moins 20 ans, avec un minimum d'entretien est généralement requise. La durée de vie du moteur souhaité pour la production d'énergie électrique est de 40 000 à 60 000 heures. Un défi majeur, par conséquent, dans la conception des moteurs Stirling est de réduire le potentiel d'usure des composants critiques ou de créer de nouveaux moyens pour eux de s'acquitter de leurs tâches.

Toutes ces caractéristiques, qui ont longtemps freiné le développement du moteur Stirling à l'échelle commerciale, seront détaillées et analysées dans le chapitre suivant.

V. Pertes thermiques :

Les schémas suivants montrent les pertes d'un système Dish-Stirling. Les données ont été acquises à un rayonnement solaire de $1000\text{W}/\text{m}^2$ sur un système SBP Dish-Stirling de 9kW. Ils sont valables uniquement pour ce système, mais d'autres systèmes réalisés ont montré des caractéristiques comparables comme nous le démontrerons par la simulation chapitre 5.

Les pertes qui doivent être considérées sont les suivantes :

- a) les pertes optiques dues à la réflectivité limitée du miroir
- b) les pertes dues au facteur limitée d'interception
- c) les pertes thermiques au niveau du récepteur
- d) les pertes de conversion d'énergie au niveau du moteur Stirling
- e) les pertes de conversion d'énergie au niveau du générateur
- f) les pertes dues aux puissances parasites

Le schéma suivant montre les différentes pertes quantitativement et il les relie à l'énergie électrique utilisable [17] :

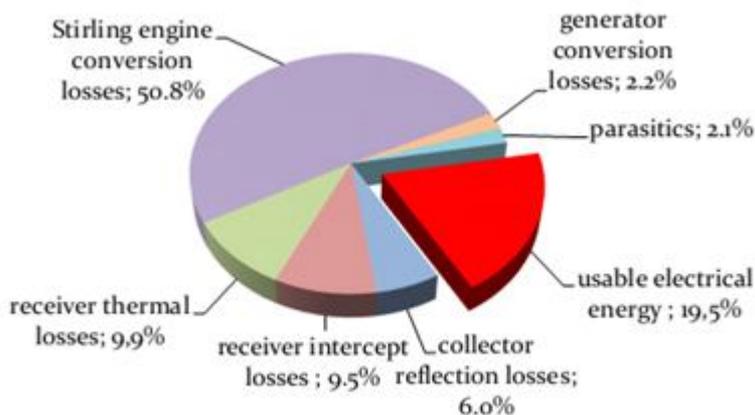


Figure 31: Pertes d'énergie et énergie utile dans le système Dish-Stirling SBP

Le second diagramme montre un graphique en cascade illustrant la réduction successive de l'énergie solaire jusqu'à l'énergie électrique final utilisable [17] :

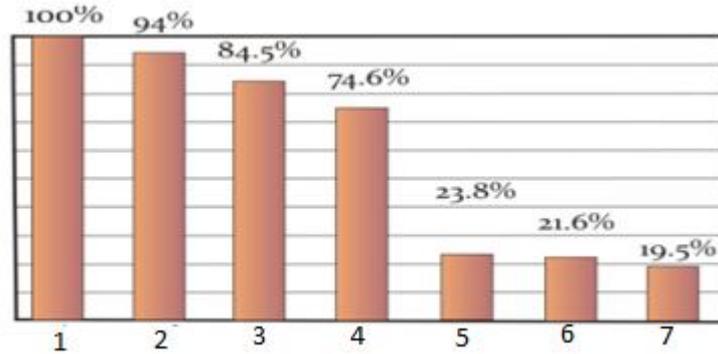


Figure 32: Tableau en cascade de l'énergie pour le système SBP

1. Energie solaire
2. Radiation réfléchi
3. Energie capturé à l'ouverture du récepteur
4. Chaleur transféré au moteur Stirling
5. Energie mécanique
6. Energie électrique
7. Energie électrique utilisable

Les pertes au niveau du moteur Stirling sont les plus importantes. Nous verrons pourquoi dans le Chapitre 4.

En résumé, la chaîne énergétique du système Dish-Stirling peut être schématisée comme suit :

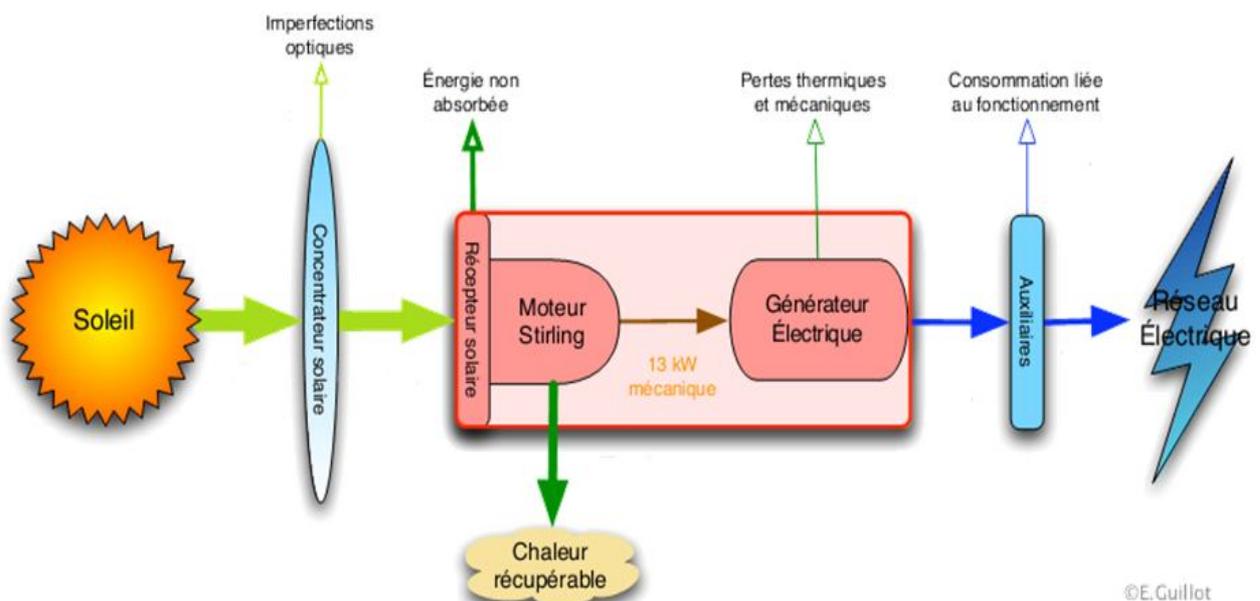


Figure 33: Schéma de la chaîne énergétique du système Dish-Stirling

VI. Comparaison avec les technologies CSP et le PV :

Dans le tableau suivant, les principales caractéristiques des systèmes Dish-Stirling et des autres systèmes de conversion solaire-électrique sont présentés. Le PV est inclus dans cette comparaison, car si certaines technologies CSP ont l'avantage essentiel sur le PV d'offrir la possibilité d'inclure des systèmes de stockage thermique pour fournir de la puissance à la demande, il n'existe, jusqu'à présent, aucun système de stockage thermique pour le Dish-Stirling, en plus de la production d'électricité directement injecté dans le réseau, ce qui explique pourquoi il est positionné en tant que concurrent au PV.

	Cylindro-parabolique	Fresnel	Tour solaire	Dish-Stirling	Photovoltaïque
Rendement solaire-électrique	15-20%	8-10%	15-25%	20-32%	8-25%
Fluide	huile thermique, eau/vapeur	huile thermique, eau/vapeur	air, sels fondus, eau/vapeur	hydrogène, hélium	-----
Température de fonctionnement (°C)	300-400	160-270	500-600	650-900	-----
Cycle thermodynamique	Rankine	Rankine organique	Rankine, baryton	Stirling	-----
Machine thermodynamique	Turbine à vapeur	Turbine à vapeur	Turbine à vapeur	Moteur Stirling	-----
Refroidissement (L/Mwh)*	3 000	3 000	2000	0	0-15
Emprise au sol	Large	Moyenne	Moyenne	Petite	Large
Expérience	élevée	faible	moyenne	moyenne	élevée
Stockage thermique	oui	oui	oui	non	non
Terrains	Plat	Plat	Pentu	Tout type	Plat
État de l'art	commercial	pré-commercial	commercial	prototypes opérationnels	commercial

Tableau 4: principales caractéristiques des systèmes de conversion solaire-électrique

*Source : EDF, [18]

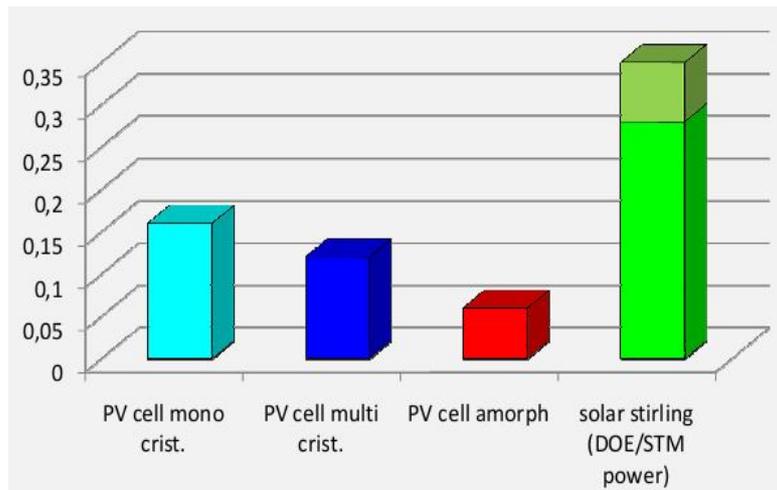


Figure 34: Comparaison entre le rendement des différents types de panneaux solaires et d'un système Dish-Stirling [23]

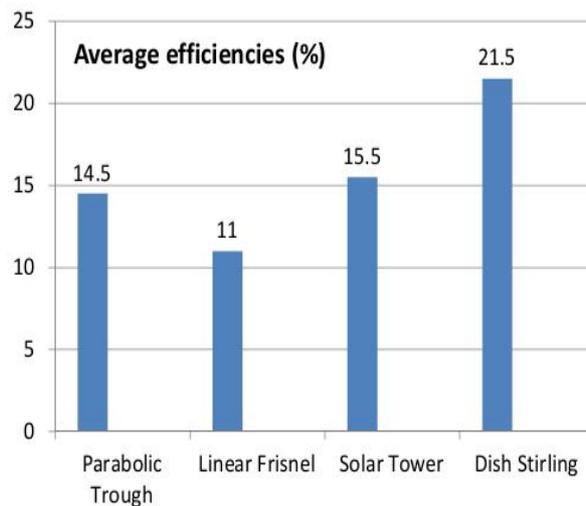


Figure 35: Efficacité moyenne des différentes technologies CSP [23]

Avantages :

- Le rendement de la technologie Dish-Stirling est le plus élevé, ceci est principalement dû au rendement élevé du cycle de Stirling (voir chapitre 4)
- Les systèmes Dish-Stirling ont besoin de peu d'eau pour leur fonctionnement et fonctionnent à des températures très élevées. C'est un avantage très important pour les régions désertiques devant le photovoltaïque dont le rendement diminue lorsque les températures dépassent 25°C.
- Les systèmes Dish-Stirling peuvent être utilisés pour les petites applications et les applications hors réseau car il n'y a pas besoin d'un champ d'héliostat de plusieurs m² mais

d'une unité qui produit jusqu'à 50kWe. En outre, ils peuvent être utilisés de façon modulaire souple et efficace, ce qui n'est pas possible des systèmes de CSP à grande échelle.

-Le Dish-Stirling permet une économie du terrain car la superficie de son installation est très petite comparé aux autres technologies solaires (2,5 ha / MW). De plus, sa structure lui permet de s'adapter à tous les types de terrains ce qui permet de produire de l'électricité dans les régions les plus difficiles d'accès. Ces petites installations sont particulièrement indiquées en remplacement de générateurs diesel pour un approvisionnement énergétique décentralisé

-L'installation est flexible et simple en utilisant une main-d'œuvre peu qualifiée.

Inconvénients :

- Il n'y a pas de systèmes de stockage pour les systèmes Dish-Stirling. La possibilité d'intégrer un stockage thermique est un avantage crucial de certains autres systèmes de CSP sur le PV. Cependant, l'hybridation est possible, afin de fournir de l'énergie à la demande.

- Comme tout système CSP, les systèmes Dish-Stirling utilisent seulement le rayonnement direct, tandis que les systèmes photovoltaïques font usage de rayonnement diffus. Ceci est un inconvénient majeur pour les zones à faible rayonnement direct.

- Les Systèmes Dish-Stirling sont encore au statut de prototype. Ils ont réussi à démontrer qu'ils peuvent produire de l'énergie électrique pour de longues périodes de temps, et même des applications à grande échelle ont été construites (voir annexe A6) mais n'ont pas encore démontrés leur compétitivité au niveau des coûts.

Chapitre 4 : **Le moteur Stirling**

I. Introduction :

Le moteur Stirling a été inventé par Robert Stirling en 1816 dans le but de remplacer les machines à vapeur qui explosaient et faisaient des victimes. À l'époque, il n'a pas connu l'essor escompté en raison de différents bris et d'une puissance trop faible par rapport à la machine à vapeur et au moteur à combustion interne. Mais, dans le contexte environnemental actuel, ce moteur devient de plus en plus pertinent et il est d'ailleurs l'objet de récents projets industriels et de recherches ; En effet, le moteur de type Stirling est un moteur à combustion externe : il peut donc fonctionner avec n'importe quelle source de chaleur : carburant fossile, mais aussi rayonnement solaire par exemple. Cependant, bien qu'il soit apparu en 1816, le moteur Stirling reste très peu développé aujourd'hui et on lui préfère encore largement les moteurs à explosion qui possèdent pourtant une efficacité énergétique inférieure. Il est alors légitime de se demander quelles sont ou quelles ont été les barrières qui ont conduit à son faible développement et quel sont aujourd'hui les réels potentialité de ce moteur dans la technologie Dish-Stirling.

Pour répondre à ces questions, nous devons d'abord comprendre le fonctionnement de ce moteur afin d'avoir une idée globale sur les difficultés liés à sa fabrication. Tout d'abord, pour comprendre la mécanique du moteur, une description détaillée des différents types de moteurs Stirling et du régénérateur s'impose. Ensuite, nous nous pencherons sur l'aspect thermodynamique en étudiant les différences entre le cycle Stirling théorique et le cycle réel faisant intervenir les volumes morts et l'efficacité du régénérateur afin de mieux comprendre les limites du moteur. Enfin, la dernière partie sera consacrée au fluide de travail dont le choix est très important et dont la nature a un lien direct sur l'efficacité du moteur Stirling et sur les difficultés de sa conception .

II. Principe de Base :

Le moteur Stirling est un système fermé qui comporte un cylindre où le gaz de travail est enfermé (souvent de l'air, de l'hélium ou de l'hydrogène), avec une partie en contact avec une source chaude et une autre en contact avec une source froide et deux organes mobiles principaux : un piston moteur et un déplaceur de gaz qui l'oblige à se situer soit vers la source chaude, soit vers la source froide. Les deux pistons sont reliés entre eux de telle sorte que leurs mouvements sont en opposition de phase de 90° (un quart de tour). Le fonctionnement du moteur Stirling repose sur le fait qu'un fluide se détend lorsque sa température augmente, poussant ainsi le piston. Il se contracte dans le cas inverse et le piston revient dans la position initiale. Dans ce moteur, on chauffe et on refroidit alternativement le gaz contenu dans le cylindre. On peut favoriser le fonctionnement en maintenant une extrémité du moteur (cylindre) à une température élevée constante, tandis que l'autre extrémité reste à basse température, le gaz devant se déplacer de la source chaude à la source froide. Il suit un cycle appelé cycle Stirling.

III. Cycle Stirling théorique :

Le cycle de fonctionnement du moteur de Stirling dans le diagramme de Clapeyron (P, V) est composé de deux isothermes et deux isochores :

A→B : Compression isotherme

B→C : Chauffage isochore

C→D : Détente isotherme

D→A : Refroidissement isochore

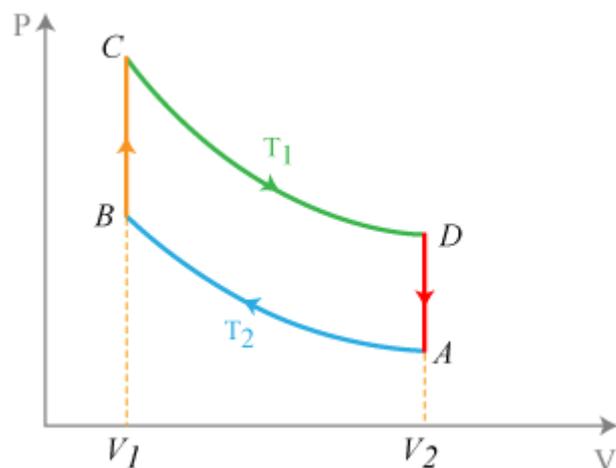


Figure 36: Cycle théorique du moteur de Stirling

Seule l'étape de détente fournit du travail : les autres transformations s'effectuent grâce à l'inertie du moteur (par l'intermédiaire du volant d'inertie). Le résultat du cycle est l'absorption de chaleur à haute température, le rejet de chaleur à basse température et la production de travail utilisable par le milieu extérieur.

IV. Différents types de Moteurs Stirling :

Il existe deux grandes catégories de moteur Stirling, qui se distinguent par la façon dont ils déplacent le gaz entre les côtés chaud et froid du cylindre :

- La conception de type alpha présente deux pistons moteurs dans des cylindres indépendants, et le gaz est entraîné entre les espaces chaud et froid.
- Les moteurs Stirling type à déplacement, appelés bêta et gamma, utilisent un déplaceur mécanique isolé pour pousser le gaz de travail entre les côtés chaud et froid du cylindre. Le déplaceur est suffisamment grand pour isoler les faces chaude et froide du cylindre et pour déplacer une quantité importante de gaz. Il doit y avoir assez d'écart entre le déplaceur et la paroi du cylindre pour permettre au gaz de circuler facilement.

Les configurations mécaniques des moteurs Stirling sont donc généralement divisées en trois groupes connus sous le nom de moteurs Alpha (moteur à deux pistons) Beta et Gamma (moteurs à déplacement) :

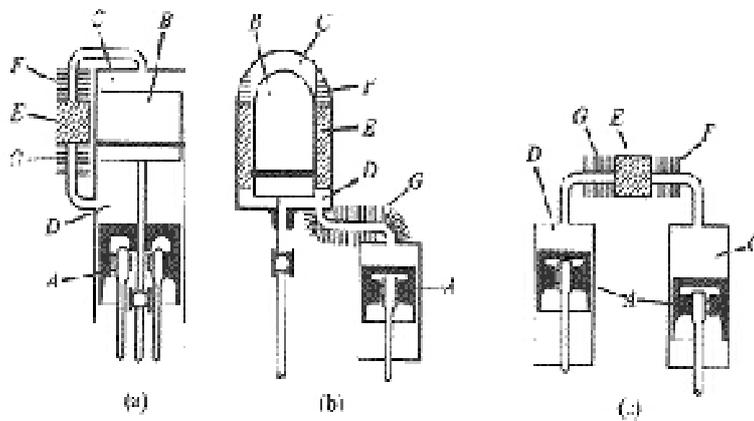


Figure 37: Configurations mécaniques du moteur Stirling

(a) : Beta, (b) : Gamma, (c) : Alpha, A – piston moteur, B - Piston déplaceur, C – espace d'expansion, D – espace de compression, E – régénérateur, F – Source chaude G – Source froide

1. Moteur Alpha :

Les moteurs Alpha ont deux pistons cylindriques séparés qui sont connectés en série par un dispositif de chauffage, de régénérateur et de refroidisseur. Le gaz est déplacé par le mouvement combiné de 2 pistons moteurs pour le moteur de type alpha.

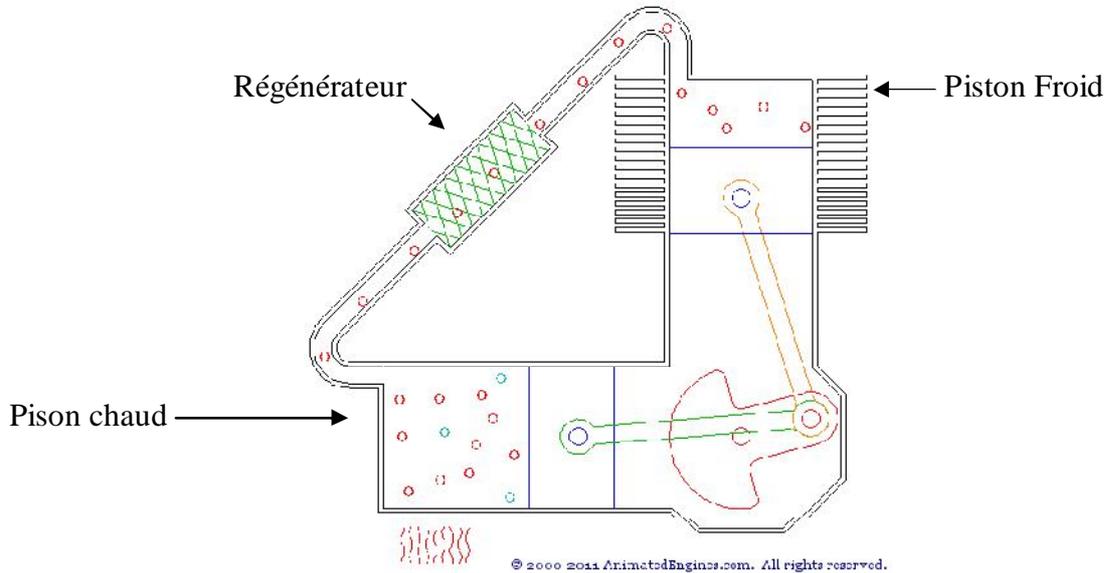


Figure 38: Schéma du moteur Alpha

Le moteur alpha dissocie de façon nette la source chaude de la source froide. En effet, un cylindre réchauffe le gaz, un autre le refroidit. La cinématique est telle qu'on fait passer le gaz d'un cylindre à l'autre. Ce type de moteur a un ratio puissance-volume très élevé, mais possède des problèmes techniques liés (fréquemment) aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints.

Le moteur Alpha est conceptuellement la configuration la plus simple du moteur Stirling mais qui présente cependant l'inconvénient que les deux pistons ont besoin d'avoir des joints pour contenir le gaz de travail.

Le moteur Alpha peut également être couplé en une configuration compacte de cylindres multiple ce qui permet une puissance spécifique très élevée, nécessaire pour un moteur d'automobile par exemple. Un schéma de cette configuration est illustré dans la Figure 41. Notons que les quatre cylindres sont reliés entre eux, de sorte que l'espace de dilatation d'un cylindre est relié à l'espace de compression du cylindre adjacent par un dispositif de chauffage de régénérateur et de refroidisseur connectés en série. Les pistons sont généralement entraînés par un plateau oscillant, ce qui entraîne un mouvement alternatif sinusoïdal pur ayant une différence de phase de 90 degrés entre les pistons adjacents.

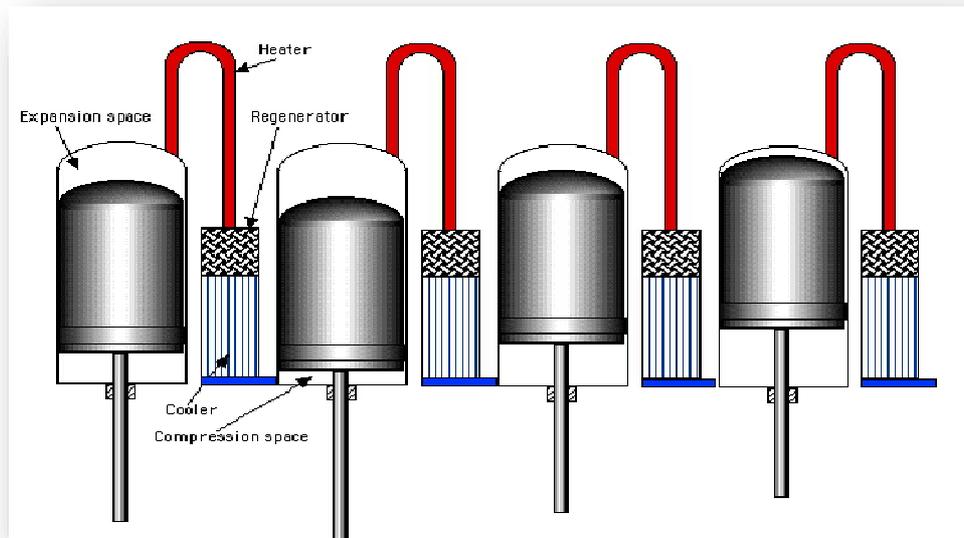
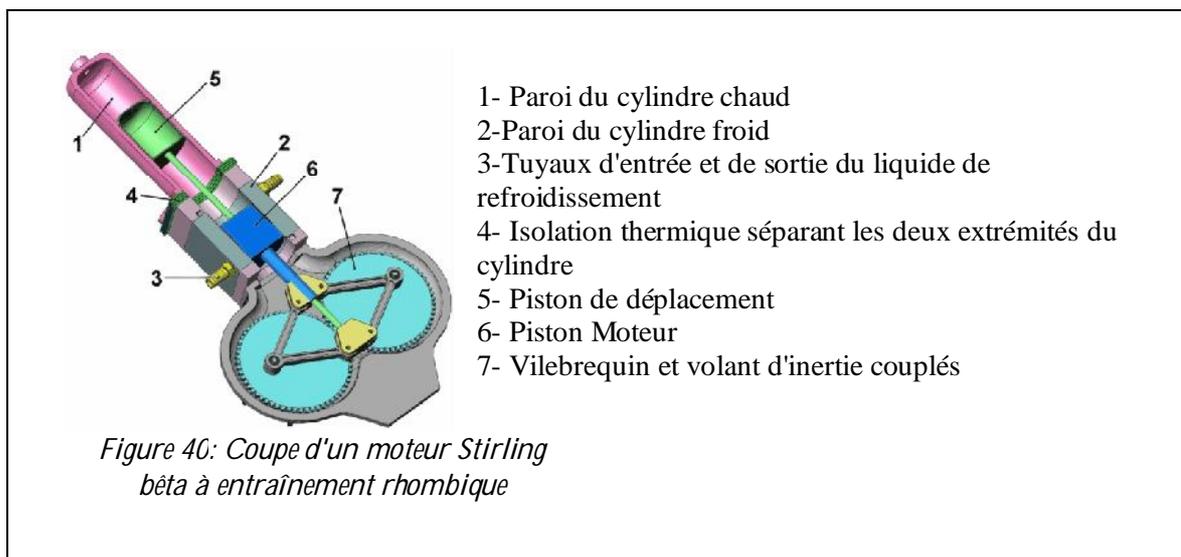


Figure 39: Illustration d'un moteur Alpha à 4cylindres

2. Moteur Beta :

Un Stirling Bêta a un simple piston de puissance placé coaxialement avec un piston de déplacement. Le piston de déplacement sert uniquement à propulser le gaz de l'échangeur de température chaude, vers l'échangeur de température froide. Sur un cycle complet, ce piston ne consomme pas d'énergie. Ce moteur ne requiert pas de " joint " mobile dans la partie chaude du moteur et peut atteindre des rendements élevés de compression, grâce aux pistons qui sont capables de se chevaucher pendant leur déplacement. Les avantages sont la compacité et l'absence de perte aérodynamique ; l'inconvénient principal provient des pertes thermiques par conduction.



3. Moteur Gamma :

Le moteur Gamma est un compromis entre le moteur Alpha et le moteur Bêta. La seule différence réside dans le fait que les deux pistons se meuvent dans des cylindres distincts mais reliés. Dans le premier, le déplaceur fait passer l'air alternativement du côté chaud et du côté froid. Le deuxième cylindre, plus petit, loge le piston moteur qui récupère les excès de pression. Le volume balayé par le déplaceur ne pouvant nécessairement pas être balayé par le piston moteur, il constitue un volume mort. Pour cette raison, le moteur Gamma ne peut pas atteindre des rapports de compression élevés, ce qui limite les possibilités de rendement. En revanche, sa simplicité mécanique en fait un système largement utilisé, également sur les moteurs à plusieurs cylindres.

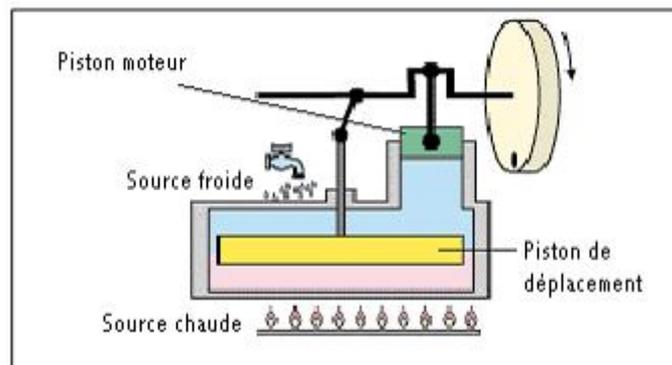


Figure 41: Schéma de principe du moteur Gamma

On se propose ici de décrire le cycle Stirling en parallèle avec le fonctionnement du moteur Gamma : On suppose que le piston de déplacement se trouve en position haute.

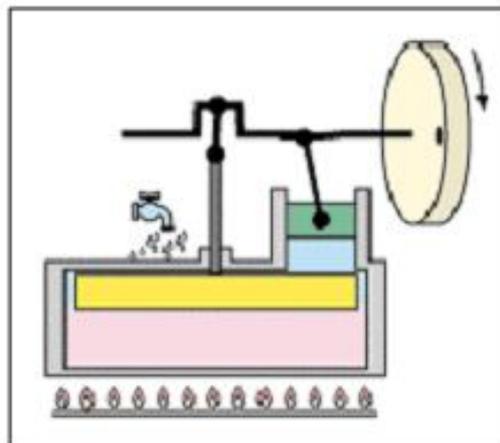
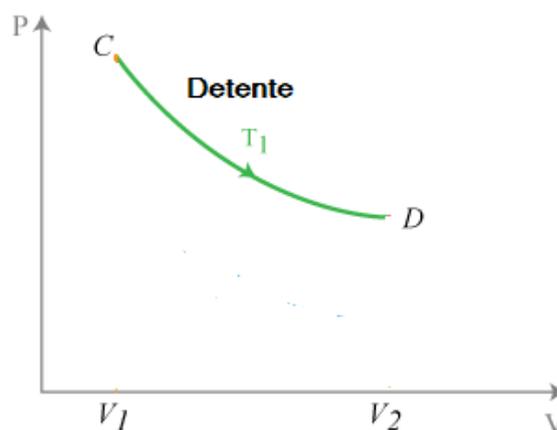
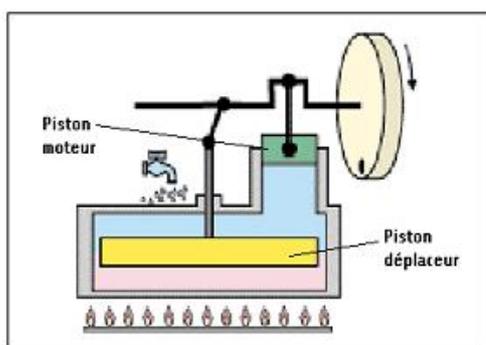
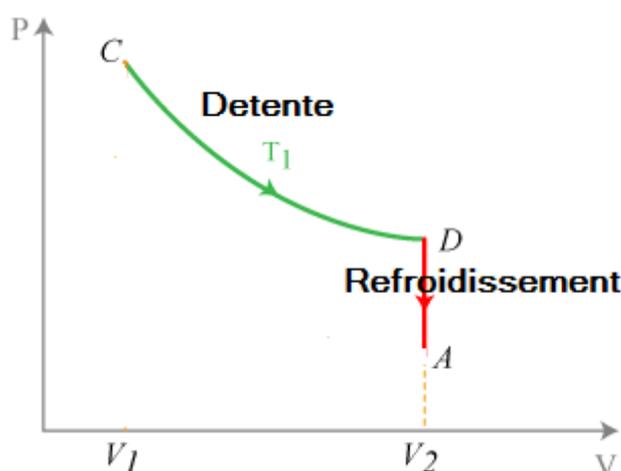
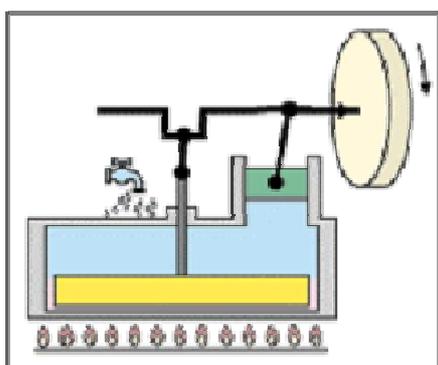


Figure 42: Schéma du piston du moteur Gamma en position haute

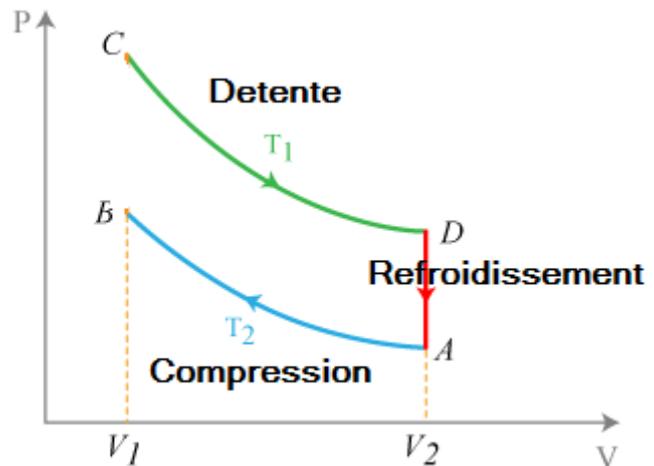
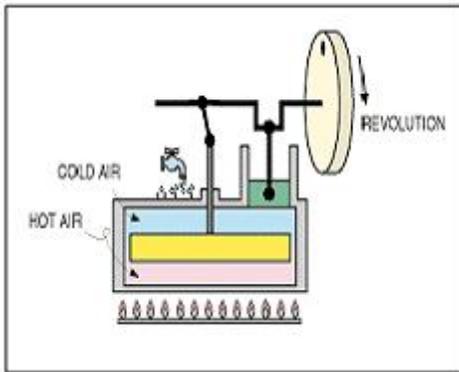
1-Détente : La source chaude permet la détente du fluide : son volume s'accroît et sa pression diminue. La dilatation du gaz oblige alors le piston moteur à monter jusqu'à sa position la plus haute, et grâce au système de bielles-manivelles le déplaceur descend à sa position intermédiaire. Cette étape est appelée « Détente » et se traduit par une isotherme sur le diagramme PV (la température de la source chaude est supposée constante). C'est pendant cette étape que l'on peut récupérer de l'énergie mécanique.



2- Refroidissement : Le piston moteur est à sa hauteur maximale (le gaz est à son volume maximal V_2) et se déplace très lentement. Le déplaceur, d'autre part, est en mouvement dans la zone chaude et amène le gaz à se déplacer vers la zone froide. Dans cette conception, le déplaceur lui-même joue le rôle du régénérateur par le stockage temporaire de l'énergie tirée du gaz lorsqu'il se refroidit. Lorsque le piston de déplacement a atteint sa position la plus basse alors tout le fluide se trouve dans la zone froide. La source froide récupère l'énergie thermique restante. La température et la pression du gaz diminuent. On appelle cette étape « le Refroidissement ». Elle se traduit par une isochore dans le diagramme PV. Le piston moteur commence à descendre.



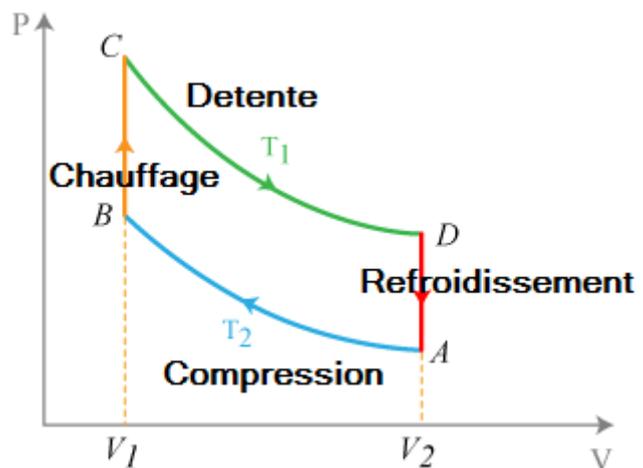
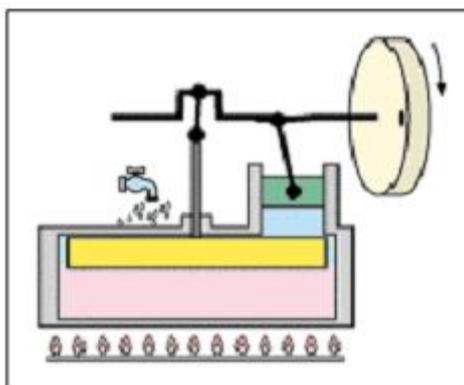
3-Compression : À la position 3, parce que tout le gaz se trouve dans la région froide, il se contracte (La chaleur est retirée du gaz) provoquant le piston moteur à glisser vers le bas et grâce au système de bielles et de manivelles, le piston de déplacement retourne à sa position intermédiaire. Cette étape est appelée « Compression » et est représentée par une isotherme dans le diagramme PV (la température est supposée constante au cours de la compression).



4-Chauffage : En position 4, le piston moteur est à son volume minimal V_1 , et se déplace lentement. Le piston déplaceur se déplace vers le haut forçant le gaz dans la zone chaude.

Lorsque le piston de déplacement a atteint sa position la plus haute alors tout le fluide se trouve dans la zone chaude. L'étape est appelée « chauffage », et se traduit par une isochore sur le diagramme PV car le mouvement du piston de déplacement n'induit pas de variation de volume.

Le piston de déplacement se trouve alors en position haute et le cycle peut recommencer.



Le démarrage du moteur de cylindre libre peut être automatique si le moteur est en position verticale, sinon, un pot léger est nécessaire de commencer les mouvements initiaux, après quoi le moteur tourne vigoureusement tant que les températures prévues pour les deux extrémité chaude et l'extrémité froide du cylindre sont maintenues

4. Autres classifications

Les classifications Alpha, Beta et Gamma sont des classifications nécessaires pour comprendre le fonctionnement mécanique du moteur Stirling mais insuffisantes. Afin de classer correctement et rigoureusement les moteurs Stirling, on identifie trois niveaux de catégorisation :

- o Le mode de fonctionnement,
- o L'agencement des cylindres (Alpha, Beta, Gamma)
- o Le couplage des pistons.

1. **Le mode de fonctionnement** d'un moteur dénote la manière dont les composants d'un moteur Stirling travaillent ensemble. Il ya six termes utilisés pour décrire le mode de fonctionnement : double effet, à simple effet, monophasée, multiphase, résonnant et non résonnant. Un moteur Stirling peut fonctionner en :

- o Simple ou double effet : selon que le piston travaille sur une seule ou sur ses deux faces ; les moteurs à double effet sont caractérisés par la possession d'un seul piston par cylindre ;

- o Mono ou multiphasique : selon l'état thermodynamique du fluide, qui peut être diphasique par exemple dans les fluidynes ;

- o Résonnant ou non résonnant : cette distinction n'est pertinente que pour les moteurs à piston libre. Le mode de fonctionnement résonnant correspond aux machines dont le déplaceur et le piston se déplacent de façon continue et, dans la plupart des cas, de façon sinusoïdale. Le mode non résonnant ou surexcité ("over driven") correspond à un fonctionnement pour lequel le mouvement du déplaceur et/ou celui du piston sont discontinus.

2. **Pour le couplage du piston**, il existe deux formes de base avec de nombreuses subdivisions : les moteurs Stirling cinématique (Kinematic Stirling engine) et les moteurs Stirling à piston libre (Free piston Stirling engine) :

- Les pistons d'un moteur Stirling cinématique sont relié mécaniquement entre eux et à l'arbre de sortie, comme déjà vus dans les configurations précédentes.
- Dans les moteurs à pistons libres, les pistons sont couplés par des effets dynamiques de fluide plutôt que par des liaisons mécaniques solides. Le moteur Stirling à piston libre ne comporte que deux pièces en mouvement, le déplaceur et le piston de puissance, qui rebondissent en avant et en arrière entre les ressorts. La synchronisation des pistons, l'angle de phase entre les pistons et les courses sont définis par la dynamique du système. Les pistons sont des masses du système, une force de rappel est fournie par des ressorts à gaz hydrodynamique ou des ressorts mécaniques. Les moteurs fonctionnent à la fréquence propre du système masse-ressort. Un alternateur linéaire est incorporé dans le piston moteur pour extraire l'énergie du moteur. Parce que l'électricité est générée en interne, il n'y a pas de joints coulissants dans la région à haute pression du moteur, et aucune lubrification à l'huile n'est nécessaire. Dans certains modèles, la friction et l'usure sont presque éliminés par l'utilisation de paliers à gaz sans contact ou la suspension très précise par des ressorts planaires. Ces modèles promettent de longue durée de vie avec un minimum d'entretien ce qui les rend très attractifs.

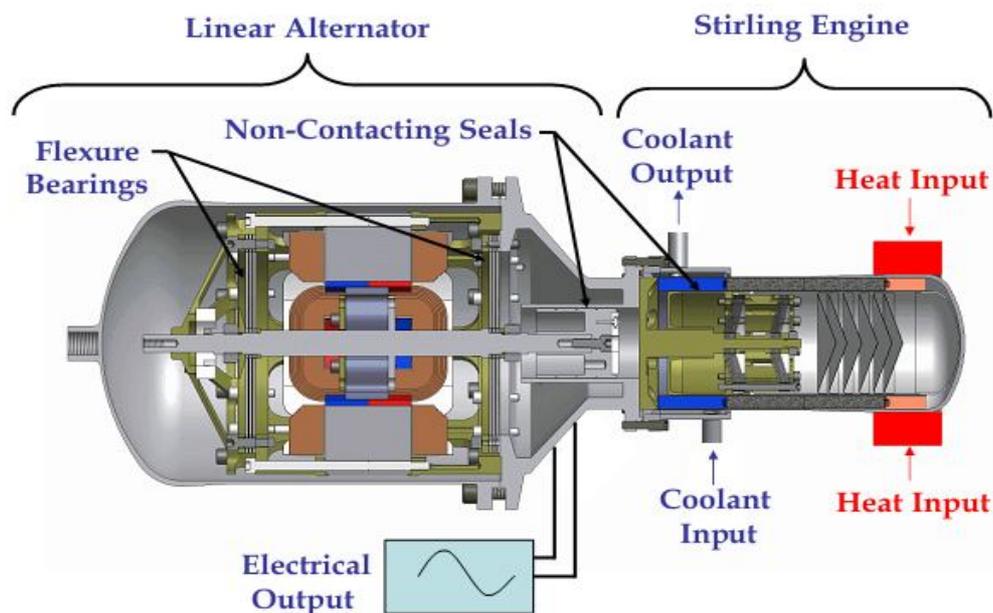
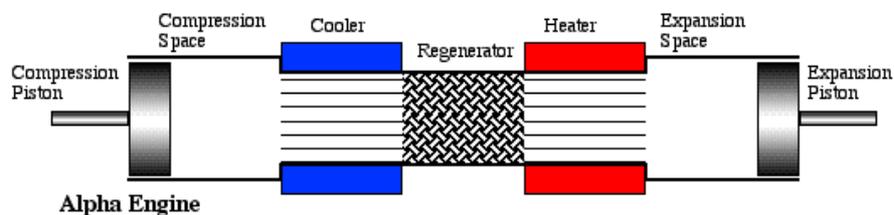


Figure 43: Schéma illustrant les différents composants d'un moteur à piston libre

V. Le régénérateur :

Les Moteurs Stirling perdent de leur efficacité en raison des grandes différences de température du fluide de travail et à cause du chauffage et du refroidissement des cylindres. Au passage du gaz autour du déplaceur, de la chaleur constante est récupérée par le gaz qui atteint le cylindre froid à une température plus élevée que nécessaire. Cela se produit à nouveau en sens inverse lorsque le gaz traverse le déplaceur sur le chemin du retour, en arrivant au cylindre chaud plus froid que nécessaire. Un régénérateur, ou économiseur comme Robert Stirling l'a appelé, a été développé pour augmenter l'efficacité d'un moteur Stirling. Sur un plan pratique, le régénérateur est un accumulateur de chaleur qu'on place entre la source chaude et la source froide. Lorsque le gaz chaud est transféré vers le cylindre froid, il est tout d'abord entraîné à travers le régénérateur, où une partie de la chaleur (énergie thermique) est déposée. Lorsque le gaz froid est de nouveau transféré, cette chaleur est récupérée ; ainsi le régénérateur "préchauffe" et "pré refroidit" le gaz de travail, en améliorant considérablement l'efficacité. Les moteurs Stirling bêta et gamma placent habituellement le régénérateur dans un tuyau relié aux deux extrémités du piston unique ou sur le déplaceur lui-même (figure 48 et 49).



Graphic courtesy of Dr. Israel Urieli of Ohio University.

Figure 44: Régénérateur dans un moteur Alpha [19]

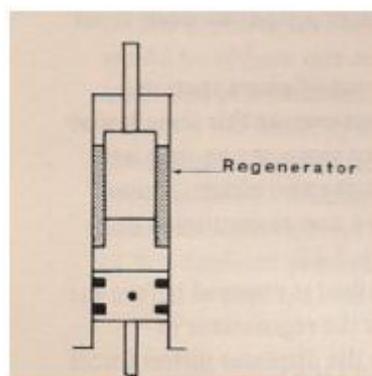


Figure 45: Régénérateur dans la paroi du cylindre d'un moteur beta

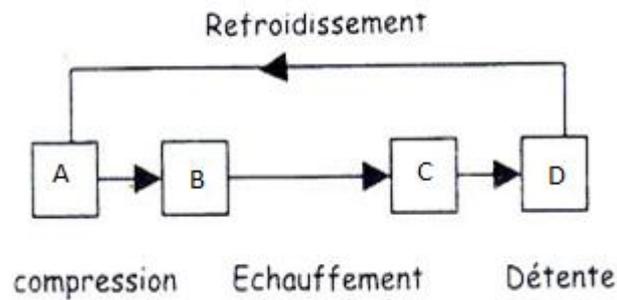


Figure 46: Diagramme indicateur théorique

Le diagramme indicateur théorique montre les quatre transformations subies par le gaz et le rôle du régénérateur :

1. Une détente isotherme (transformation AB) : transfert de chaleur d'une source de chaleur extérieure vers le fluide de travail ; le moteur produit le travail utile du cycle.
2. Une détente isochore (transformation BC) : le fluide de travail cède de la chaleur au régénérateur interne à la machine.
3. Une compression isotherme (transformation CD) : le fluide de travail cède de la chaleur à la source froide.
4. Une compression isochore (transformation DA) : le régénérateur interne à la machine cède de la chaleur au fluide de travail.

Le régénérateur est constitué d'un matériau qui conduit facilement la chaleur et possède une aire de surface élevée, typiquement une maille de plaques métalliques minces, rapprochées. Un exemple de régénérateur serait une matrice de cuivre à l'intérieur de la tuyauterie d'un moteur Stirling alpha... C'est toutefois un régénérateur d'une très grande simplicité : les moteurs Stirling plus évolués utilisent des matériaux de haute technologie qui favorisent les échanges thermiques, par exemple des céramiques nanostructurées. En réalité, c'est un appareil délicat à concevoir. Les échanges de chaleur avec un gaz sont difficiles et demandent en général des dispositifs encombrants. Le régénérateur constitue un volume "mort" qui vient contrecarrer le bénéfice de sa présence. Nous verrons par la suite dans l'étude thermodynamique, les effets du régénérateur sur l'efficacité du moteur

VI. Cycle Stirling Réel :

Dans n'importe quel moteur Stirling réel le cycle de Stirling idéalisée ne peut être atteint. Les quatre étapes sont floues ensemble et le cycle sur un diagramme-PV apparait elliptique [21].

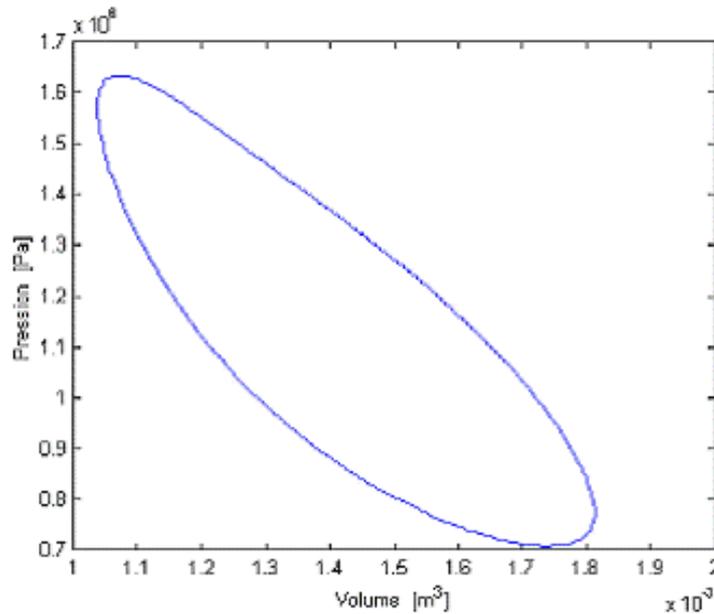


Figure 47: Cycle Stirling réel mesuré par le LATEP

Le moteur contient des volumes morts incontournables (contenant du fluide qui n'accomplit pas le cycle et donc ne contribue pas au rendement) et il est équipé de régénérateurs dont l'efficacité varie de 0 à 99%. Habituellement, la littérature propose des théories supposant une absence de volumes morts et la perfection impossible du régénérateur. En pratique, on trouve des moteurs avec un volume mort représentant 58% du volume total.

L'efficacité thermique E_t d'un moteur Stirling en prenant considération des volumes morts et du régénérateur (voir liste des symboles) est sous la forme [22]:

$$E_t = \frac{\left\{ T_3 \ln \left(\left\{ \frac{V_D + V_P + KT_3}{V_D + KT_3} \right\} \right) - T_1 \ln \left(\left\{ \frac{V_D + V_P + KT_1}{V_D + KT_1} \right\} \right) \right\}}{\left\{ T_3 \ln \left(\left\{ \frac{V_D + V_P + KT_3}{V_D + KT_3} \right\} \right) + (T_3 - T_1) \frac{1 - e}{k - 1} \right\}} \quad 6 - 1$$

Avec K fonction des volumes morts : $K = \frac{V_{Mc}}{T_3} + \frac{V_{Mr}}{T_r} + \frac{V_{Mf}}{T_1}$ 6-2

On remarque que l'efficacité thermique du moteur Stirling dépend à la fois de la qualité du régénérateur et de la proportion de volumes morts présents.

Sans volumes morts ($K=0$) l'équation serait réduite à :

$$E_t = \frac{T_3 - T_1}{T_3 + (T_3 - T_1) \frac{(k-1) \ln \frac{V_P}{V_D}}{(k-1) \ln \frac{V_P}{V_D}}} \quad 6-3$$

En l'absence de régénérateur ($e = 0$), ce qui représente le pire des cas pour l'efficacité du cycle du moteur Stirling. L'efficacité thermique serait alors :

$$E_t = \frac{T_3 - T_1}{[T_3 + (T_3 - T_1) / (k-1) \ln \frac{V_P}{V_D}]} \quad 6-4$$

On remarque que les équations (6-3) et (6-4) sont identiques c'est-à-dire que l'on a la même efficacité en l'absence de volumes morts et en l'absence du régénérateur.

Si maintenant nous disposons du régénérateur parfait $e = 1$ et d'une absence totale de volumes morts, ce qui serait idéal pour un moteur Stirling, l'efficacité thermique serait :

$$E_t = \frac{T_3 - T_1}{T_1} \quad 6-5$$

Ce qui nous fait dire que le cycle de Stirling possède l'efficacité du cycle de Carnot opérant entre deux sources thermiques T_3 et T_1 respectives.

Cependant, un moteur Stirling muni d'un mauvais régénérateur demandera plus de chaleur et nécessitera un meilleur refroidissement que s'il était équipé d'un régénérateur efficace.

Les volumes morts vont dégrader à la fois l'efficacité énergétique et augmenteront les apports de chaleurs externes. Notons que la construction d'un moteur Stirling entraîne fatalement la présence de volumes morts incontournables.

Pour atteindre de hautes performances, un moteur Stirling doit être équipé du régénérateur le plus efficace qu'il soit. Si ce n'était pas le cas, il vaut mieux ne pas avoir de régénérateur du tout. Ce qui nous fait l'économie de son volume mort.

Ainsi, il paraît légitime de chercher à optimiser le fonctionnement du régénérateur pour améliorer celui du moteur. On peut jouer sur différents facteurs pour améliorer l'efficacité du régénérateur. En effet, on peut modifier la conductivité thermique du matériau constituant la matrice, sa capacité thermique ou encore choisir un matériau plus ou moins poreux.

- Influence conductivité thermique

On peut constater ici que l'augmentation de la conductivité thermique de la matrice du régénérateur entraîne une diminution des performances. Cela peut s'expliquer par le fait que si la conductivité thermique augmente, les pertes par conduction interne augmentent également dans le matériau.

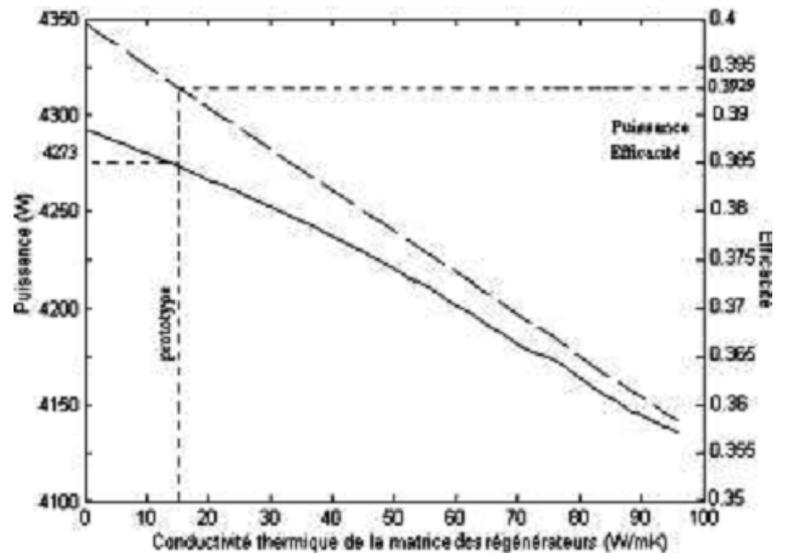


Figure 48: Effet de la conductivité thermique du régénérateur sur les performances [25]

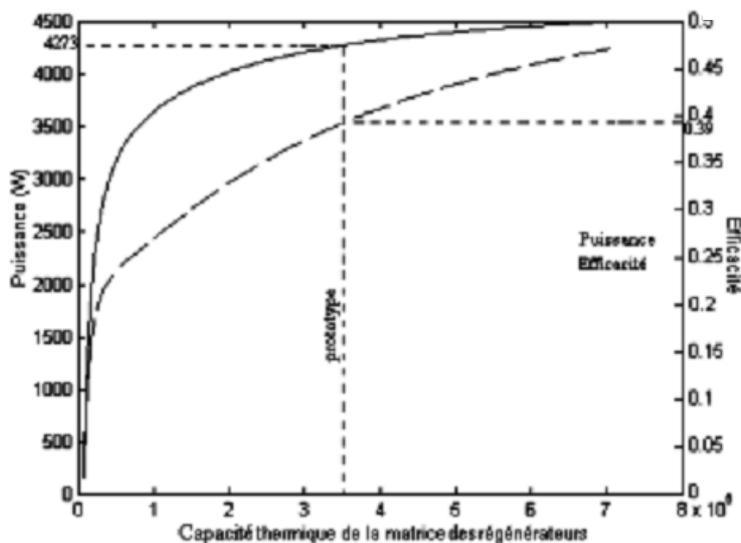


Figure 49 : Effet de la capacité thermique du régénérateur sur les performances. [25]

- Influence capacité thermique

On peut constater une amélioration des performances du moteur avec l'augmentation de la capacité thermique de la matrice du régénérateur.

- Influence de la nature de la matrice du régénérateur :

Le tableau suivant montre les capacités de moteurs dont la seule différence est la nature de la matrice du régénérateur.

Métal constituant la matrice du régénérateur	Capacité de chaleur volumétrique J/m ³ K	Conductivité W/ (m.K)	Puissance du moteur W	Efficacité du moteur %	Énergie échangée au régénérateur (J)
Acier	3.846510 ⁶	46	4258	38.84	441.25
Acier inox	3.545 10 ⁶	15	4273	39.29	448.72
Cuivre	3.3972 10 ⁶	389	Faible	Faible	Faible
Laiton	3.145 10 ⁶	100	4080	34.6	415.67
Aluminium	2.322 10 ⁶	200	3812	29.16	378.03
Granit	2.262 10 ⁶	2.5	4091	34.51	430.75

Tableau 5: Influence des caractéristiques de la matrice du régénérateur.

On peut constater que le meilleur rendement et la plus grande puissance sont obtenus avec une matrice en acier inox ce qui correspond à un matériau de petite conductivité thermique et de grande capacité thermique. Le cuivre quant à lui s'oxyde rapidement ce qui conduit à la dégradation rapide de ses propriétés thermophysiques et donc dégrade considérablement les performances du moteur [23]. Cela confirme bien les conclusions qui ont été tirées précédemment : Pour augmenter l'échange thermique au régénérateur et réduire les pertes internes par conductivité, nous avons intérêt à choisir un matériau de capacité thermique élevée et de conductivité faible.

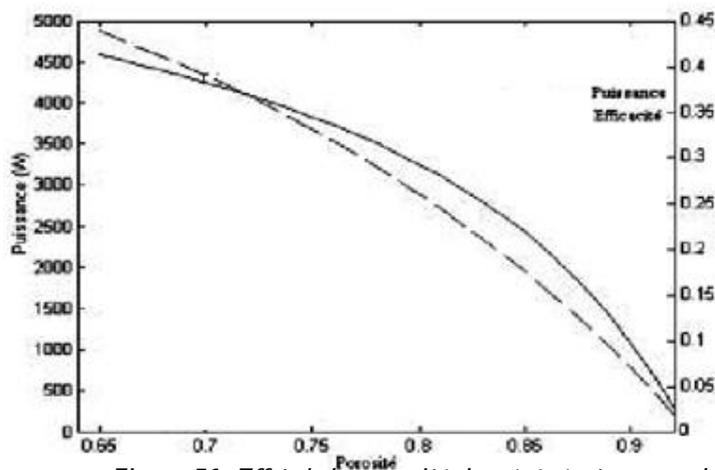


Figure 50: Effet de la porosité des régénérateurs sur les performances.

- On peut constater que la réduction de la porosité entraîne une augmentation des performances.

Théoriquement, l'efficacité du moteur augmente avec l'accroissement de la température et de la pression du fluide (cycle Stirling) En pratique, les conditions sont telles que les températures se situent entre 650 et 800 °C et les pressions entre 5 et 20 MPa. La courbe ci

dessous a été tracée pour différentes températures de fonctionnement à la source chaude. La source froide étant maintenue à température ambiante ($T_f = 293 \text{ K}$). La figure 54 décrit l'évolution de la puissance mécanique du moteur en fonction de la vitesse de rotation, pour différents niveaux de température de source chaude (de 800 K à 1100 K). Les performances croissent avec la température [23] :

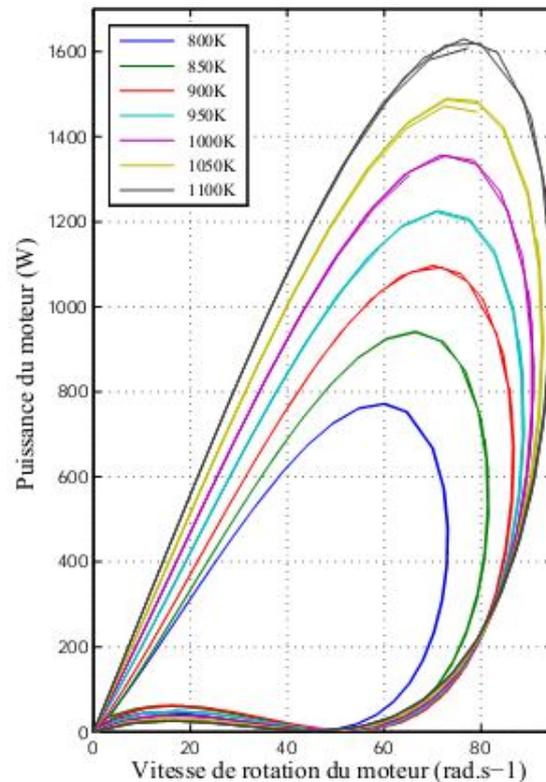


Figure 51: Diagramme Puissance en fonction de la vitesse [23]

V. Fluide de travail :

Pour un moteur Stirling, le gaz idéal est l'hydrogène ou l'hélium. En effet le rendement du moteur est proportionnel à l'agitation thermique du gaz de travail. Plus le gaz sera "léger", plus il pourra vite réagir à un changement de température (Inversement proportionnel à la masse). C'est donc la valeur de l'accélération qui est essentielle.

L'équation qui décrit la propagation de la chaleur dans une substance est l'équation différentielle partielle de la chaleur qui s'écrit :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho \cdot C} \times \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

Avec : k = conductivité thermique

ρ = Densité (Kg/m³)

C = capacité thermique

Les propriétés de gaz que nous devons donc regarder pour l'élaboration d'un moteur idéal sont le poids moléculaire, la viscosité, la conductivité thermique et la capacité thermique.

Gaz	poids moléculaire	Viscosité (μ) (g/cm/sec)	Capacité thermique (J/gK)	Conductivité thermique (k) (w/cm ² /K/cm).
Air	29	0,00045	Cp 1,11 Cv 0,8235	0,000583
Hydrogène	2	0,00019	Cp 14,72 Cv 10,72	0,0037
Hélium	4	0,00043	Cp 5,20 Cv 3,12	0,0032

Tableau 6 : Différents gaz et leurs propriétés

Le poids moléculaire PM : C'est la masse des molécules, 2 pour l'hydrogène, 4 pour l'hélium et 29 pour l'air. Cela veut dire que pour un volume donné l'air aura une densité, une masse et un poids plus grand que le même volume d'hélium ou d'hydrogène.

La viscosité (μ), est la résistance à l'écoulement interne $H_2=0,00019$ $H_e=0,00043$ Air=0,00045 (à 800K et 1 MPa) c'est fonction de la température et de la pression. L'hélium et l'air sont deux fois plus visqueux que l'hydrogène H_2 . La viscosité affecte les caractéristiques d'écoulement notamment la résistance à l'écoulement. La viscosité est dépendante de la température. Pour les gaz, la viscosité augmente quand la température diminue et pour les liquides c'est l'inverse.

La capacité Thermique : c'est la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente. Plus elle est grande, plus la quantité de chaleur à apporter à un matériau pour élever sa température est grande.

Cp et Cv représentent la Capacité thermique à Pression constante ou à Volume constant.

Pour nos gaz :

Cp (Pression constante) $H_2=14,72$ $H_e=5,20$ Air=1,11

Cv (Volume constant) $H_2=10,72$ $H_e=3,12$ Air=0,8235

L'air possède une valeur moins importante que l'hydrogène ou l'hélium. La capacité thermique est exprimée en joules par grammes par Kelvin ou J/gK. L'air n'emmagasine qu'un quart de la quantité de chaleur que celle conservée par l'hélium et 1/12 de celle conservée par l'hydrogène.

La conductivité thermique : Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température. Plus simplement c'est la capacité à conduire la chaleur. Nous la mesurerons en Watt par centimètre carré par degré Kelvin par centimètre ou ($w/cm^2/K/cm$). Pour nos gaz, cela donne $H_2=0,0037$ $H_e=0,0032$ Air=0,000583. Cela nous dit que l'hydrogène et l'hélium ont une conductivité 6 fois supérieure à celle de l'air.

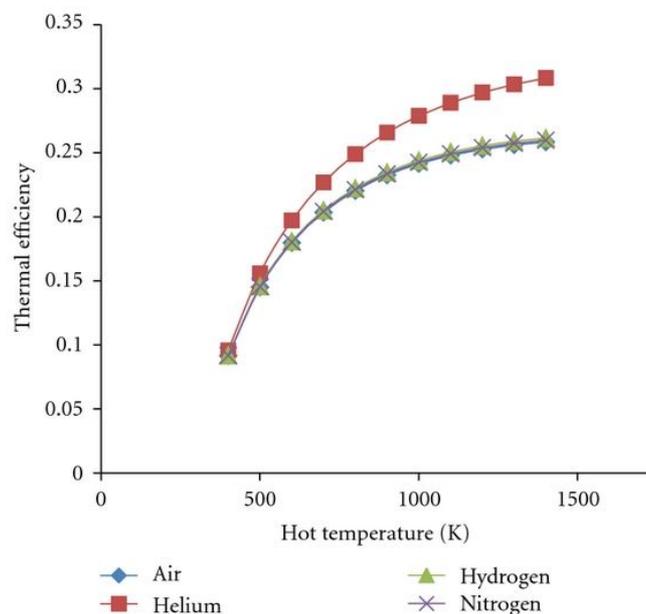


Figure 52: Diagramme Efficacité thermique en fonction de la température de la source chaude pour différents gaz [20]

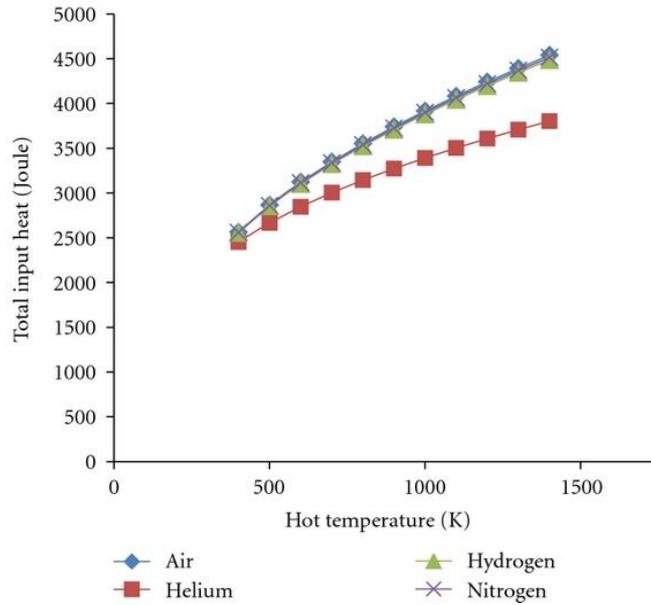


Figure 53: Diagramme chaleur total entrante en fonction de la température de la source chaude pour différents gaz [20]

Le cycle Stirling nécessite un gaz de travail qui gagne et perd de la chaleur rapidement et c'est en grande partie ce qui limite la vitesse d'un moteur Stirling. Si l'hydrogène présente les meilleures caractéristiques (meilleur transfert de chaleur), ses propriétés explosives rendent son utilisation à une échelle commerciale plus compliquée. L'azote, n'a pas cet inconvénient mais ses propriétés thermiques sont nettement moins bonnes. L'hélium présente un compromis souvent choisi malgré sa très grande viscosité qui nécessite une meilleure étanchéité des pistons.

L'équation de la chaleur montre en tout cas que la vitesse $\delta T / \delta t$ avec laquelle la température varie en un point, est proportionnelle à la " constante " $k / (\rho \cdot c)$ du gaz utilisé. Et c'est là que l'hydrogène et l'hélium montrent une supériorité par rapport à l'air ou l'azote. Dans ce qui suit, k s'exprime en watt/mètre/K, ρ en kg/m^3 et c en joule/kg/K .

Pour l'air : $k / (\rho \cdot c) = 0,025 / (1,29 \times 718) = 0,000027 \text{ m}^2/\text{sec}$.

Pour l'hélium : $k / (\rho \cdot c) = 0,14 / (0,164 \times 3116) = 0,00027 \text{ m}^2/\text{sec}$ (10 fois plus que l'air).

Pour l'hydrogène : $k / (\rho \cdot c) = 0,18 / (0,083 \times 10183) = 0,00021 \text{ m}^2/\text{sec}$ (8 fois plus que l'air).

Pour l'azote : $k / (\rho \cdot c) = 0,026 / (1,15 \times 743) = 0,00003 \text{ m}^2/\text{sec}$ (quasi comme l'air).

Plus vite la chaleur diffuse dans le gaz, plus vite on pourra faire tourner le moteur et gagner en puissance et/ou en rendement. Lorsqu'on résout l'équation numériquement (Figure 7), on est surpris de constater que la vitesse de diffusion chute rapidement à moins de 3 mm / sec. C'est plus de 100 000 fois plus lent que la vitesse du son ou de la pression. Cela montre que dans un moteur, la totalité du gaz à réchauffer ou à refroidir doit être en contact très intime avec le régénérateur.

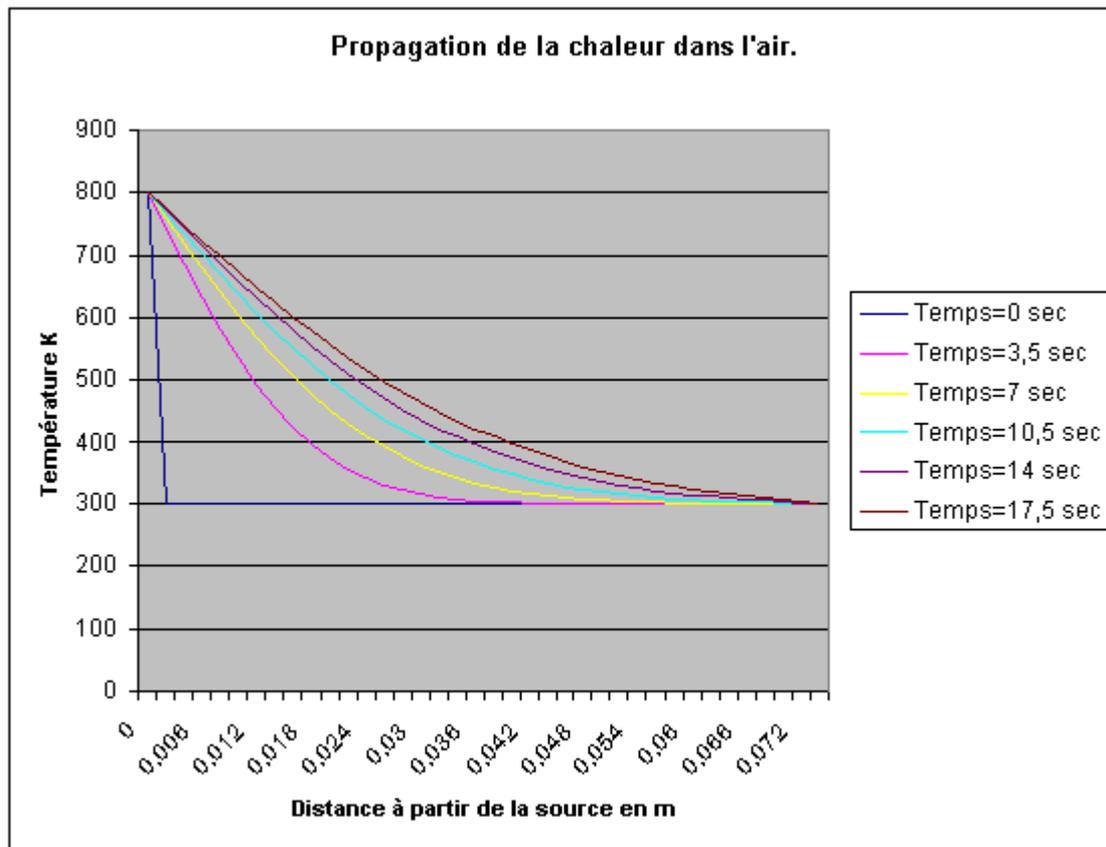


Figure 54: Propagation de la chaleur dans l'air [23]

La source chaude à 800K est à l'extrémité gauche du tube ($x = 0$). Au départ tout le gaz est à 300 K.

Enfin, la vitesse de propagation de la chaleur dans le gaz n'est pas le seul facteur pour le rendement et la vitesse de rotation d'un moteur. Il y a encore le transfert de chaleur entre le régénérateur et le gaz. La vitesse de ce transfert est proportionnelle à la différence de température et à la surface de l'échangeur. La théorie est fort complexe mais on constate en pratique que l'échange de chaleur est inversement proportionnel à la densité du gaz. On voit que, là aussi, l'hydrogène et l'hélium ont un net avantage sur l'air ou l'azote.

VII. Conclusion :

Après cette analyse, il est maintenant évident qu'en théorie, le moteur Stirling peut être une machine très rentable pour convertir de la chaleur en travail mécanique. L'efficacité d'une conception et d'une fabrication qui exclurait les volumes morts tout en incluant un régénérateur quasi-parfait équivaldrait à réaliser une machine de Carnot. Autrement dit ce serait la réalisation du moteur thermique le plus efficace qui soit en termes de rendement énergétique. Mais l'étude approfondi du moteur Stirling nous a prouvé qu'il était difficile voir impossible d'arriver à ce résultat et que le rendement du moteur est dépendant de plusieurs paramètres. Celui-ci est dégradé par les volumes morts, par l'inertie thermique, par les couplages thermomécaniques, ou encore par les nombreuses pertes.

Malgré de très nombreux avantages (voir tableau ci contre), le moteur se heurte a des problèmes de dynamique des fluides, des problèmes difficiles à résoudre au niveau des régénérateurs des volumes morts , des tuyaux ou du piston déplaceur (problèmes de diamètre, de longueur, de turbulences à créer ou éviter, d'étanchéité etc.) et qui rendent la conception d'un tel moteur délicate et couteuse , n'ayant aujourd'hui que peu d'applications commerciales ou en grande série . (Voir Annexe).

Cependant, cette situation est entrain d'évoluer favorablement avec le développement des recherches sur la production d'énergie et particulièrement sur celles concernant les énergies renouvelables. Le moteur de Stirling fait aujourd'hui l'objet de nombreux programmes de recherche développement notamment aux États-Unis, et grâce aux progrès réalisés, le Dish-Stirling aujourd'hui, au même titre que le photovoltaïque ou l'éolien, pourrait être une alternative crédible aux modes de production énergétique à base d'énergies fossiles. Les progrès réalisés sont tels qu'ils ont permis d'atteindre des rendements dépassant ceux des autres technologies thermo solaires. La question qui se pose est : le KW/h produit par ce système est il rentable ? Car le Dish-Stirling ne survivra que si le prix du KWh produit est compétitif. C'est la question à laquelle nous essaierons de répondre par la suite.

Avantages	Inconvénients
<p>- Silencieux : pas d'explosion, conception engendrant peu de vibrations.</p> <p>- Bon rendement : jusqu'à 40% contre 35% pour les moteurs à combustion interne.</p> <p>- Multi sources : combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique...</p> <p>- Non polluant</p> <p>- Fiabilité, entretien et maintenance aisées, Durée de vie importante : peu de maintenance et une longue durée de vie, il ne comporte ni soupapes, ni bougies, ni injecteurs; les cylindres sont lubrifiés à sec; les parties mobiles ne sont pas en contact avec les gaz de combustion et ne sont donc pas contaminées par les résidus (on peut utiliser des paliers à roulements); il y a très peu de composants auxiliaires et le fonctionnement se fait à vitesse constante .</p> <p>- 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)</p> <p>-Inversible : le cycle Stirling est réversible, le moteur entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur capable de refroidir à -200 °C ou de chauffer à plus 700 °C, selon le sens d'entraînement.</p>	<p>- Prix élevé : coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés. Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.</p> <p>- Problèmes d'étanchéité difficiles mais pas impossibles à résoudre</p> <p>- Difficile à commander : les variations rapides et efficaces de puissance sont difficiles à obtenir avec un moteur Stirling. Celui-ci est plus apte à marcher à puissance nominale constante. Ce point est un gros handicap pour l'industrie automobile mais ne présente pas de problèmes pour la production d'électricité.</p>

Tableau 7 : Avantages et inconvénients du moteur Stirling

Chapitre 5 :
Performances et Potentiel
économique par simulation
sur le logiciel SAM

I. Étude des performances :

1. L'équation fondamentale de la collecte solaire

Le concentrateur d'un système Dish-Stirling intercepte le rayonnement solaire à travers une grande surface et le concentre dans une petite zone. Le récepteur absorbe cette énergie et transfère la plus grande partie au moteur Stirling. La quantité de chaleur qui est transférée au moteur peut être appelée chaleur utile Q_{useful} .

Une équation simple de l'équilibre énergétique, appelé « équation fondamentale de la collecte solaire » [8], décrit la théorie sous-jacente à de nombreux aspects du concentrateur et de la conception du récepteur. Cette équation régit les performances de tous les systèmes de collecte de l'énergie solaire et guide la conception des systèmes Dish-Stirling. L'équation fondamentale de la collecte solaire est :

$$Q_{useful} = I_{b,n} A_{app} E(\cos \theta_i) \rho \phi \tau \alpha - A_{rec} [U(T_{rec} - T_{amb}) + \sigma F(T_{rec}^4 - T_{amb}^4)] \quad (1-1)$$

A_{app} : Air de l'ouverture du concentrateur

A_{rec} : Air de l'ouverture du récepteur

E : Fraction de la superficie de l'ouverture du concentrateur non ombragé par le récepteur

F : Conductance radiatif équivalente

$I_{b,n}$: Faisceau du rayonnement solaire normal (insolation)

Q_{useful} : Quantité de chaleur provenant du récepteur

T_{amb} : Température ambiante

T_{rec} : Température de fonctionnement du récepteur

U : Coefficient de convection-conduction de perte de chaleur des courants d'air à l'intérieur de la cavité du récepteur, et la conduction à travers les parois du récepteur

α : Coefficient d'absorption du récepteur

τ : Transmittance de quoi que ce soit entre le réflecteur et l'absorbeur (comme une fenêtre couvrant le récepteur)

θ_i : L'angle d'incidence (angle entre les rayons du soleil et une ligne perpendiculaire à l'ouverture du concentrateur, pour les concentrateurs paraboliques, cet angle est de 0 degré)

ρ : Réflectivité de la surface du concentrateur

σ : Constante de Stefan-Boltzmann de transfert d'énergie par rayonnement

Φ : Proportion de capture ou d'interception (fraction de l'énergie quittant le réflecteur qui pénètre dans le récepteur).

L'équation 1-1 montre que la quantité de rayonnement solaire atteignant le récepteur dépend de la quantité disponible (déterminée par $I_{b,n}$ et θ_i), la taille effective du concentrateur (déterminée par A_{app} et E), et la réflectivité de la surface de concentration (ρ). La performance thermique du récepteur dépend de la conception du récepteur (déterminée par τ et α) et les pertes de chaleur par convection, conduction et rayonnement.

2. Concentrateur :

L'avantage de la concentration est évident à partir de l'équation fondamentale de la collecte thermique solaire 3-1. Afin de maximiser Q_{useful} , A_{app} doit être grande et A_{rec} aussi petite que possible.

Les paramètres en relation avec la conception du concentrateur sont :

A_{app} : Air de l'ouverture du concentrateur

A_{rec} : Air de l'ouverture du récepteur

E : Fraction de la superficie de l'ouverture du concentrateur non ombragé par le récepteur

θ_i : L'angle d'incidence

ρ : Réflectivité de la surface du concentrateur

Φ : Proportion de capture ou d'interception

Le rendement du concentrateur s'écrit :

$$\eta_{conc} = E(\cos \theta_i)\rho\phi \quad 1-2$$

E est typiquement supérieur à 95% dans la plupart des modèles [8] et, l'angle d'incidence pour un concentrateur parabolique étant nulle, ce qui rend son cosinus=1, les deux paramètres essentielles de cette équation sont la réflectivité et la fraction de capture. (La fraction de l'énergie réfléchi par le concentrateur qui pénètre dans le récepteur, définie pour une certaine ouverture du récepteur A_{rec} et affectée par les erreurs optiques, les erreurs de suivi solaire et les erreurs d'alignement du miroir et du récepteur).

3. Récepteur :

Le récepteur est l'interface entre le concentrateur et le moteur. Il absorbe flux solaire concentré et la convertit en énergie thermique qui chauffe le gaz de travail du moteur Stirling. La surface d'absorption est généralement placée en arrière du point focal d'un concentrateur de telle sorte que la densité de flux à la surface d'absorption est réduite. Une ouverture est placée au foyer pour réduire le rayonnement et la perte de chaleur par convection à partir du récepteur. Les parois de la cavité entre l'ouverture de réception et la surface de l'absorbeur sont des surfaces réfractaires. La taille de l'absorbeur et parois de la cavité est généralement maintenu à un minimum afin de réduire les pertes de chaleur et le coût du récepteur.

Le fonctionnement du récepteur peut être compris en termes des paramètres indiqués ci-dessous de l'équation fondamentale de collecte solaire, qui a été introduit au début de ce chapitre :

τ : Transmittance

α : Coefficient d'absorption

A_{rec} : Aire de l'ouverture du Récepteur

U : Coefficient des pertes de chaleur par convection-conduction

F : Conductance radiatif équivalente

T_{rec} : Température de fonctionnement du Récepteur

Les deux premiers termes (Transmittance et Coefficient d'absorption) sont des paramètres optiques et doivent être maintenus aussi proches que possible de la valeur maximale de 1. Le reste des paramètres se trouve dans la partie soustractive droite de l'équation qui représente la perte de chaleur à partir du récepteur. Un objectif de la conception du récepteur est de minimiser ces valeurs.

La performance d'un récepteur est définie par le rendement thermique du récepteur qui est définie comme l'énergie thermique utile délivré au moteur divisée par l'énergie solaire entrant dans l'ouverture de réception. En utilisant les termes de l'équation fondamentale de la collecte solaire, le rendement thermique du récepteur peut être écrit comme [8] :

$$\eta_{rec} = \tau\alpha - \frac{U(T_{rec}-T_{amb})+\sigma F(T_{rec}^4-T_{amb}^4)}{\eta_{conc}CR_g I_{b,n}} \quad 1-3$$

Comme on peut le voir dans l'équation 3-9, l'efficacité du récepteur peut être améliorée en augmentant la transmittance de l'isolation, ce qui augmente le coefficient d'absorption de la surface, qui réduit la température de fonctionnement, ou qui permet de réduire la capacité de la cavité à perdre de la chaleur par conduction, convection et rayonnement (termes U et F).

4. Moteur Stirling

Le rendement du moteur thermique est la fraction de l'énergie thermique fournie par le récepteur qui peut être convertie en travail mécanique. L'efficacité du cycle de conversion est limitée par le cycle de Carnot (moteur idéal). Le rendement du cycle de Carnot est une fonction de seulement les températures à laquelle la chaleur est transférée vers et depuis le moteur et forme une limite théorique à l'efficacité d'un moteur. L'efficacité d'un vrai moteur, appelé rendement du moteur, peut être écrit en termes d'efficacité de cycle de Carnot :

$$\eta_{eng} = \beta_{Carnot} \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad \mathbf{1 - 4}$$

Où :

β_{Carnot} : Le rapport entre le rendement réel du moteur et le rendement du cycle de Carnot

T_H : Température d'entrée de la chaleur (température absolue)

T_L : Température de rejet de la chaleur (également température absolue).

Le terme en température est le rendement du cycle de Carnot.

L'Équation 1-4 montre que l'augmentation de la température d'entrée de la chaleur (c'est à dire de la source chaude) améliore le rendement du moteur. Indépendamment de la taille du collecteur ou de combien d'énergie est convertie pour une température de rejet de chaleur fixe (généralement proche de la température ambiante), plus la température de l'apport d'énergie thermique est élevée, plus le rendement du moteur l'est également.

L'Équation 1-4 montre également que la réduction de la température de refroidissement améliore le rendement du moteur. Dans la conception des systèmes Dish-Stirling, un effort considérable est consacré à la conception de systèmes de refroidissement qui rejettent la chaleur à une température aussi proche que possible de la température ambiante.

5. Puissance parasite et alternateur :

La mesure la plus importante de la performance du système Dish-Stirling est l'efficacité de conversion solaire-électrique net. Pour ce paramètre, la puissance électrique consommée pour faire fonctionner le système, appelée puissance parasite ($P_{parasitics}$), doit être soustraite de la production brute de l'alternateur. En termes mathématiques, le rendement net de conversion solaire-électrique est :

$$\eta_{conv,net} = \eta_{conv,gross} - \frac{P_{parasitics}}{I_{b,n}A_{app}} \quad 1 - 5$$

Avec

$$\eta_{conv,gross} = \eta_{conc}\eta_{rec}\eta_{eng}\eta_{alt} \quad 1 - 6$$

La Puissance parasite comprend des ventilateurs de refroidissement à commande électrique, les pompes de refroidissement, les contrôles, et les moteurs de suivi...

6. Production d'énergie :

Jusqu'à ce point, la performance instantanée du système Dish- Stirling a été présentée. La puissance est la mesure instantanée de combien la production d'énergie produite à un moment donné est rapide. En fin de compte, personne ne s'intéresse à la quantité d'énergie électrique qui est produite par le système sur une période de temps. Par exemple, un système peut produire 25 kW de puissance électrique à midi, quand l'ensoleillement est de 1000 W/m², mais l'intérêt pour l'utilisateur est de savoir si le système est capable de produire 250 kWh (kilowattheures) d'énergie électrique pendant ce jour-là [13].

Si la puissance varie sur une période de temps, (ce qui est le cas pour les technologies solaires) la puissance doit être intégrée au cours de cette période pour obtenir de l'énergie. L'Équation 1-7 montre cette intégration afin de déterminer la quantité nette d'énergie E produite sur une année :

$$E = \int_{year} \eta_{conv,net} I_{b,n} A_{app} dt \quad 1 - 7$$

Comparé à d'autres systèmes de conversion électriques solaires, le système Dish-Stirling a la capacité de produire de grandes quantités d'énergie sur une journée (ou un an). C'est

principalement en raison de la grande efficacité intrinsèque du système. En outre, parce que les composants ont généralement une faible inertie thermique, le système Dish- Stirling répond rapidement aux états transitoires (pour profiter de l'ensoleillement) et à une perte d'énergie minimale pendant le refroidissement.

7. Coût moyen actualisé de l'énergie (LEC)

Le but ultime du développement du système Dish-Stirling est de réduire le coût moyen de l'énergie fournie au cours de la durée de vie du système. Appelé coût moyen actualisé de l'énergie (LEC), c'est le paramètre fondamental qui définit l'économie d'un système de production d'énergie Dish-Stirling (ou tout autre). LEC est le coût de production d'énergie divisée par la quantité d'énergie produite.

Le coût de production d'électricité est le coût pour faire fonctionner le système pendant une année normale, plus le paiement annuel requis pour rembourser le coût initial de la construction du système (coût du capital), divisé en versements égaux à un taux d'intérêt spécifié. L'énergie totale produite pour une année est la puissance électrique nette du système intégré (sommée) d'un an. LEC peut donc être exprimée mathématiquement comme :

$$LEC = \frac{OMC + CC \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]}{E} \quad 1-8$$

CC est le coût en capital total du système, l'OMC est le fonctionnement annuel et le coût de la maintenance du système, et E est le montant net de l'énergie produite sur une année. Les termes i et n de l'équation 1-8 sont le taux d'intérêt sur le capital et la durée de vie du système au cours des années, respectivement.

L'Équation 1-8 montre que pour réduire le coût de l'énergie solaire dérivé d'un système Dish-Stirling, le système doit être dans une région de fort ensoleillement, doit intégrer efficacement les concentrateurs et les systèmes de conversion de puissance, avoir un capital et des coûts d'exploitation faible et une longue durée de vie.

II. Potentiel de l'énergie Solaire au Maroc :

Alors que les technologies photovoltaïques convertissent une luminosité diffuse en électricité, les technologies de concentration solaire requièrent un rayonnement direct, ce qui réduit considérablement les zones du monde où cette technologie est faisable. Dans l'état de la technologie actuelle, la technologie de concentration solaire devient envisageable à partir de Radiations Normales Directes annuelles de plus de 1.900 kWh/m². Pour donner une idée, la radiation directe maximum en Belgique est de 1.200 kWh/m² tandis que le sud de l'Espagne présente une radiation de 2.200 kWh/m².

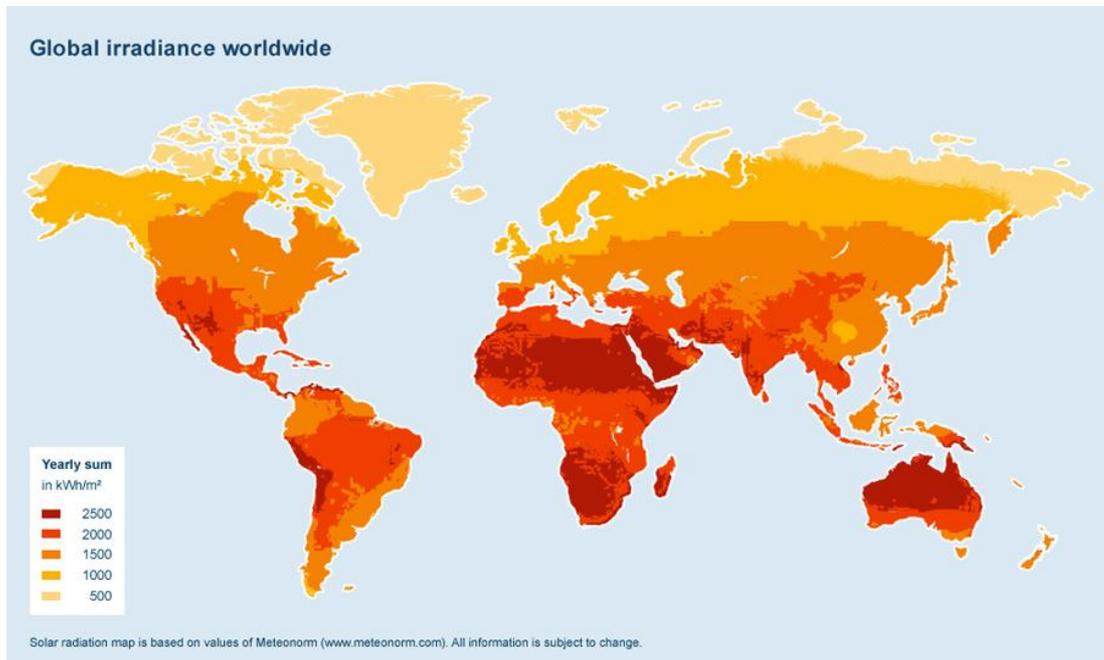


Figure 55: Carte d'irradiation du monde

Avec plus de 3000 h/an d'ensoleillement, soit une irradiation de ~ 5kWh/m²/jour, le Maroc jouit d'un gisement solaire considérable. Le potentiel solaire est particulièrement important dans les régions mal desservies en capacités de production électrique, près de 2600Kwh/m² et 30 % du territoire reçoit annuellement plus de 2000 kWh/m².

Potentiel PV

- Potentiel solaire PV Total : 37.448TWh/an(31.206 GW)
- Potentiel solaire PV Technique : 12.996 TWh/an(10.829 GW)
- Potentiel éolien exploitable : 2 GW (à l'horizon 2020)

Potentiel CSP

- Potentiel solaire CSP Total : 81.398 TWh/an(25.436 GW)
- Potentiel solaire CSP Technique :28.248 TWh/an(8.827 GW)
- Potentiel solaire CSP exploitable : 2 GW (à l'horizon 2020)

(*source : ADREE)

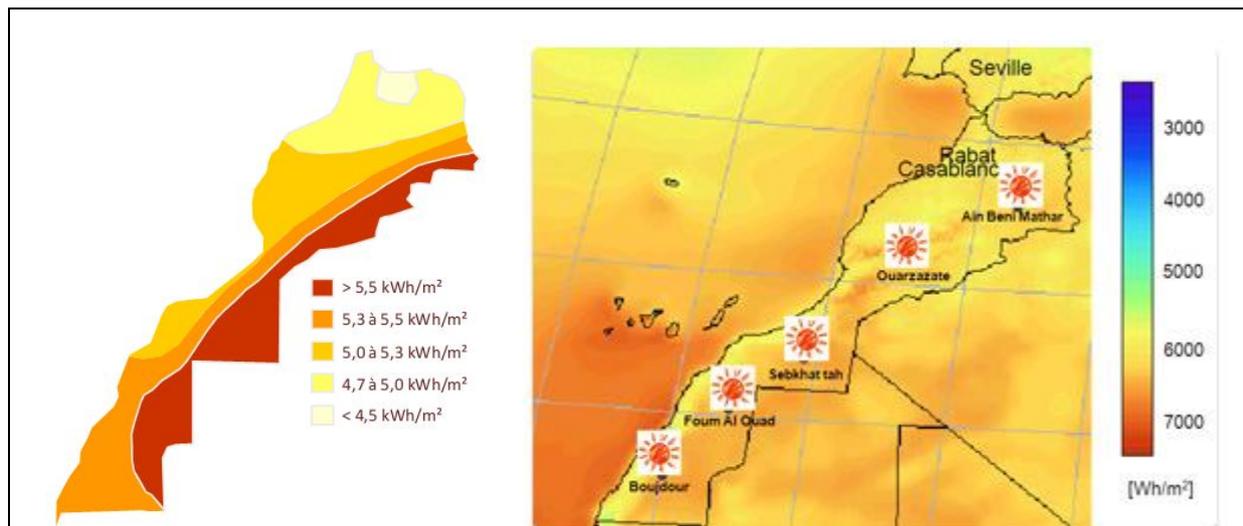


Figure 56: Carte d'irradiation moyenne du Maroc et principaux sites

Avec un DNI (Direct Normal Irradiation) de 2 425 kWh/m²/an, le site d'Ouarzazate jouit d'un des plus importants ensoleillements au monde.

Le site d'Ouarzazate, d'une superficie d'environ 33 km² (soit 3300 hectares) est situé à 7 Km au nord-est d'Ouarzazate, sur la route P32. Ce site se trouve à proximité du barrage Mansour Eddahbi (4km) dont la capacité de stockage est de 439 hm³. Les ressources en eau de ce barrage confèrent à au site un avantage en terme de rendement et ce, en permettant l'optimisation du circuit de refroidissement du cycle.

Quant à la connexion au réseau, l'énergie produite par la centrale pourra être évacuée sur le poste 225/60 KV d'Ouarzazate qui se trouve à proximité de la centrale.

En plus de son emplacement et de son niveau d'ensoleillement (6,6kWh/m²/jour), la topographie du site, la qualité de son sol et le bas risque sismique de la zone en font un emplacement idéal pour la production d'énergie solaire, toutes technologies confondues.

Dans un souci de confidentialité, les données que nous utiliserons pour la simulation seront celles du site Américain Tonopah dont les propriétés météorologiques sont similaires à celle de Ouarzazate.

III. Logiciel SAM :

1. Présentation :

SAM (System Advisor Model), à l'origine appelé "Solar Advisor Model" a été développé par le Laboratoire National des Energies Renouvelables (NREL) en collaboration avec Sandia National Laboratories en 2005. C'est un logiciel de modélisation de performances et de coûts conçu pour faciliter la prise de décision pour les personnes impliquées dans l'industrie de l'énergie renouvelable, allant des gestionnaires de projets et ingénieurs aux concepteurs de programmes, en passant par les développeurs de technologies et les chercheurs.



Figure 57: System advisor modele SAM

SAM calcule le coût et le rendement des projets d'énergie renouvelable en utilisant des modèles informatiques développés au NREL, Sandia National Laboratories, l'Université du Wisconsin, et d'autres organisations. Chaque modèle de performance représente une partie du système, et chaque modèle financier représente la structure financière d'un projet. Les modèles requièrent des données d'entrée pour décrire les caractéristiques de performance du matériel physique du système et les coûts du projet.

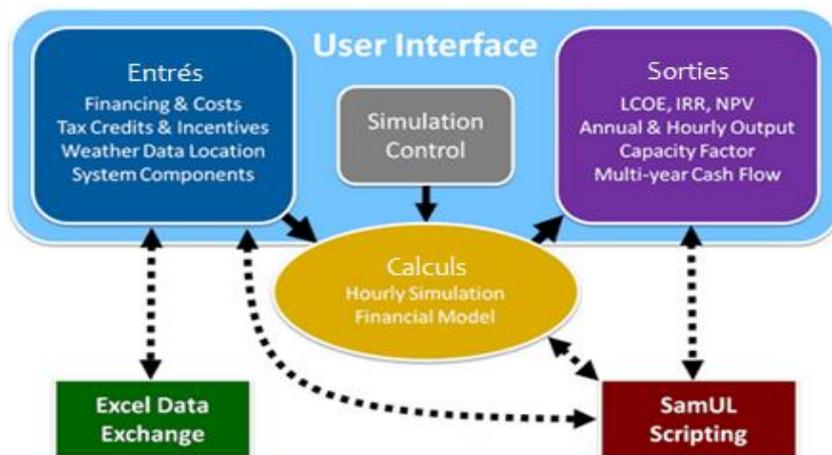


Figure 58: Illustration du processus de fonctionnement du logiciel SAM

La première étape dans la création d'un fichier SAM est de choisir une technologie et une option de financement pour notre projet (Figures 61 et 63). Chaque technologie d'énergie renouvelable dans SAM dispose d'un modèle de performance correspondant qui effectue des calculs spécifiques à la technologie. De même, chaque option de financement à SAM est également associée à un modèle financier particulier avec son propre ensemble d'entrées et de sorties. Les modèles financiers sont aussi indépendants que possible des modèles de performance pour permettre la cohérence dans les calculs financiers entre les différentes technologies. SAM remplit automatiquement les variables d'entrée avec un ensemble de valeurs par défaut pour le type de projet. Il est de notre responsabilité en tant qu'analyste d'examiner et de modifier toutes les données d'entrée, le cas échéant, pour chaque analyse. Ensuite, on fournit des informations sur l'emplacement d'un projet, le type d'équipement dans le système, le coût d'installation et de fonctionnement du système, et les hypothèses incitatives et financières.

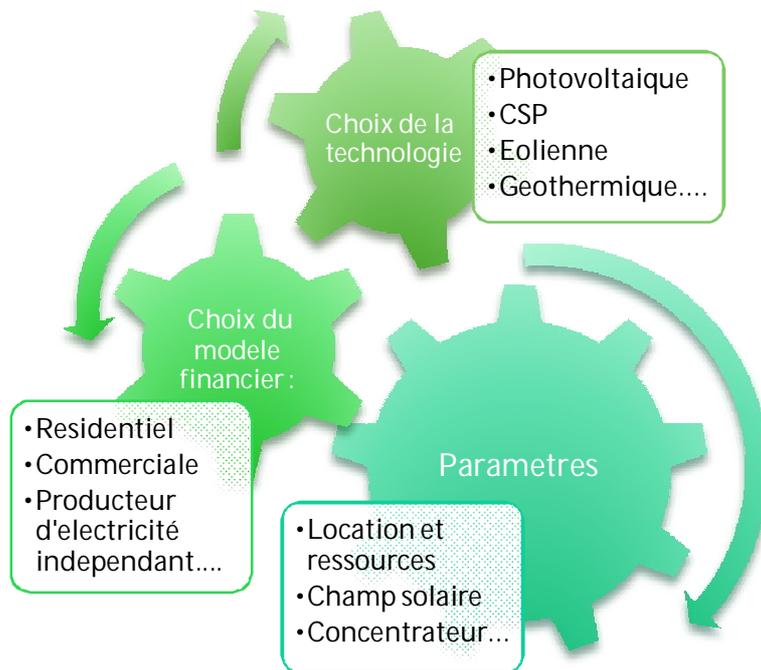


Figure 59: Processus de Simulation

Location and Resource	
Location: PHOENIX, AZ	
Lat: 33.4 Long: -112.0 Elev: 339.0 m	
System Library	
Solar Field	
Capacity: 100000 kW	
Area: 900000 m2	
Collector	
Reflectivity: 0.94	
Projected Area: 87.7 m2	
Receiver	
Aperture: 0.184 m2	
Stirling Engine	
Unit Capacity: 25 kW	
Parasitics	
Reference Inputs	
Performance Adjustment	
Percent of annual output: 96 %	
Year-to-year decline: 0 % per year	
Dish System Costs	
Total: \$ 292,400,458.43	
Financing	
Analysis: 25 years	
Solution mode: Specify IRR Target	
Time of Delivery Factors	

Figure 60: Images de quelques paramètres du système SAM

2. Analyse des paramètres d'entrée

2.1 Modèle de performance :

Chaque technologie d'énergie renouvelable dans SAM dispose d'un modèle de performance correspondant qui effectue des calculs spécifiques à la technologie. SAM affiche différentes variables sur la page de financement, en fonction de l'option de financement que l'on choisit : Pour le Dish-Stirling, SAM propose 4 modèles de financement :

- Commercial
- Commercial PPA (PPA : Prix d'offre d'achat d'électricité)
- Utilitaire IPP
- Utilitaire IPP options avancés

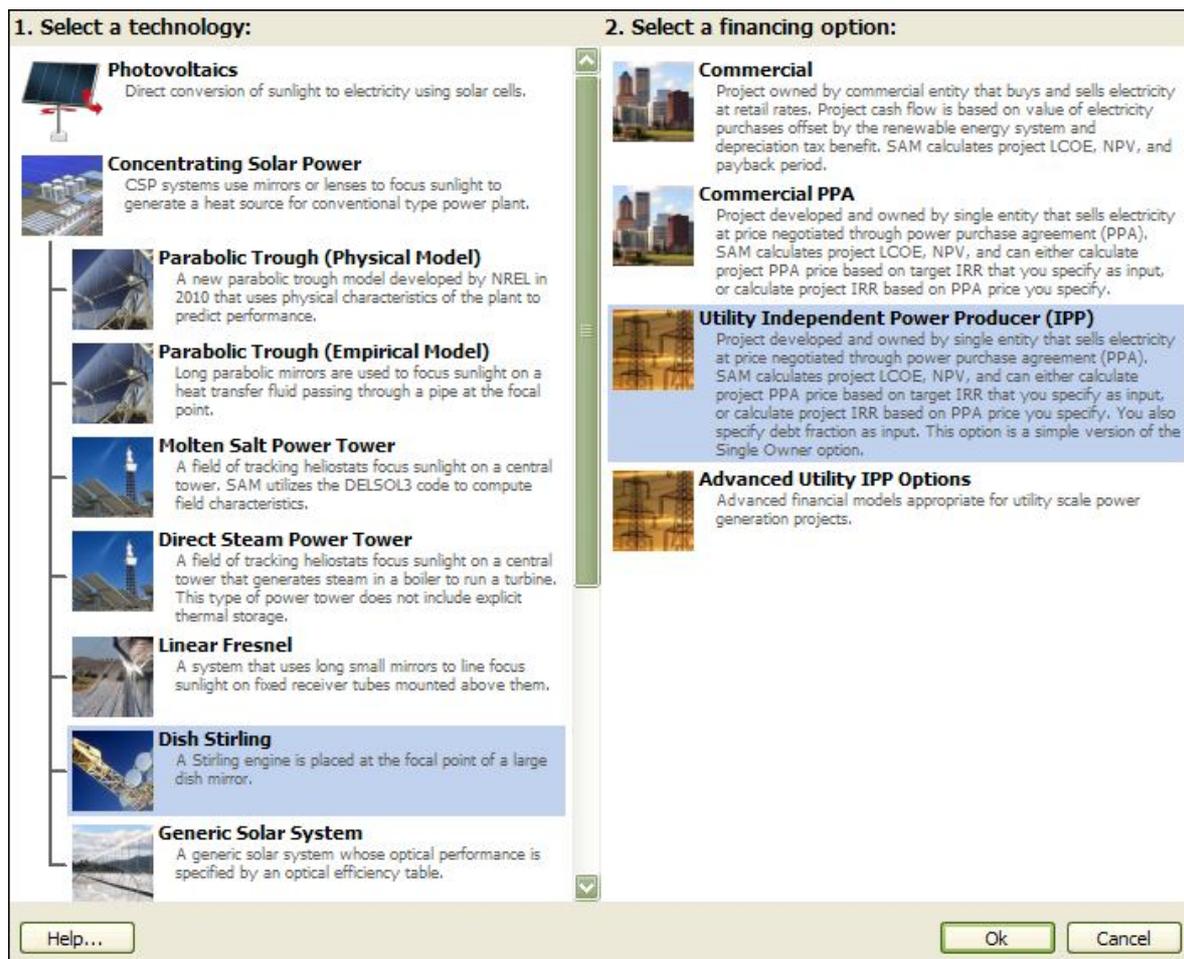


Figure 61: Interface de sélection d'entrée

Ces modèles financiers représentent deux types de projets :

- Les projets résidentiels et commerciaux qui achètent et vendent de l'électricité à des tarifs de détail et déplacent les achats d'énergie à partir de la grille.
- Les Utilitaires IPP et projets PPA commerciaux qui vendent l'électricité à un tarif de gros pour répondre à des besoins taux de rendement interne de retour.

Pour notre étude des coûts de la technologie Dish-Stirling, c'est l'option Utilité IPP qui convient.

2.2 Climat :

Parce que les modèles financiers de SAM utilisent des calculs de flux de trésorerie pluriannuels, SAM est conçu pour fonctionner avec les données météorologiques de l'année typiques qui décrivent les conditions météorologiques sur une longue période de temps.

Le site choisi pour la simulation est le site d'Ouarzazate au Maroc. Pour des raisons de données confidentielles, nous le remplaçons par le site de Tonopah aux États-Unis dont les propriétés météorologiques sont très proches de ceux d'Ouarzazate. (Voir annexe et tableau ci-dessus)

La ville de **Tonopah** est le siège du comté de Nye, dans l'État du Nevada, aux États-Unis.



Figure 62 : Emplacement sur la carte des villes de Tonopah et Ouarzazate

Les Paramètres dépendants de l'emplacement et décrivant ses ressources solaire comprennent la température ambiante, la densité de l'air (altitude), ensoleillement direct normal, la vitesse du vent et l'angle d'élévation du soleil (Figure 66) :

Ville	Tonopah	Ouarzazate
Fuseau horaire	GMT -8	GMT
Élévation	1653 m	1160 m
Latitude	38.0667 deg	31.03 deg
Longitude	-117.133 deg	6.55 deg
Direct normal irradiation	2422.2 kWh/m ² /an	2420 kWh/m ² /an
Global Horizontal irradiation	1912.2 kWh/m ² /an	Inconnu
Dry-bulb Temp	11.2°C	Inconnu
Wind speed	4.3 m/s	Inconnu

Tableau 8 : Comparaison des caractéristiques climatiques des villes de Tonopah et Ouarzazate

SAM calcule et affiche les totaux annuels et les moyennes de quatre des colonnes de données horaires fournies par le fichier de temps dans les variables d'information sur les données météorologiques.(Figure 66)

Location Information

City Timezone Latitude
State Elevation Longitude

Weather Data Information (Annual)

Direct Normal kWh/m² Dry-bulb Temp °C
Global Horizontal kWh/m² Wind Speed m/s

Figure 63 : Paramètres climatiques sur SAM

1. Champ solaire :

Les paramètres de la page « Solar Field » définissent la taille du champ solaire et l'aménagement du réseau de Dish-Stirling. Le champ solaire est supposé être un terrain rectangulaire avec des capteurs d'orientation nord-sud et est-ouest. Ces données permettront de calculer les coûts liés à la surface, le facteur d'ombre et la distance de pompage pour le calcul des pertes.

Les paramètres propres au système sont la taille de la fente dans le miroir, la vitesse d'arrimage au vent (Wind stow speed) qui est la valeur à partir duquel le concentrateur se déplace en position de rangement pour prévenir les dégâts du vent. L'énergie solaire interceptée par le récepteur est nulle pendant cette heure et la Capacité du champ solaire totale

(kWe) qui est la Capacité de production électrique nominale du champ solaire est Utilisé dans le calcul des coûts liés à la capacité.

Les autres paramètres concernent la pente du terrain que nous supposons nul dans cette simulation :

Field Layout		System Properties	
Number of Collectors, North-South	<input type="text" value="50"/>	Wind Stow Speed	<input type="text" value="16"/> m/s
Number of Collectors, East-West	<input type="text" value="80"/>	Total Capacity	<input type="text" value="100000"/> kW
Number of Collectors	<input type="text" value="4000"/>	The total system capacity is based off the nameplate output of each collector, not the simulated energy output.	
Collector Separation North-South	<input type="text" value="15"/> m		
Collector Separation East-West	<input type="text" value="15"/> m		
Total Solar Field Area	<input type="text" value="900000"/> m ²		
Array Shading Parameters			
Ground Slope, North-South	<input type="text" value="0"/> deg	Slot Gap Width	<input type="text" value="1"/> m
Ground Slope, East-West	<input type="text" value="0"/> deg	Slot Gap Height	<input type="text" value="1"/> m

Figure 64: Paramètres SAM du champ solaire

2. Concentrateur :

Cette section comprend toute les informations sur le miroir. Ces données serviront à calculer l'énergie solaire interceptée par le récepteur, et le facteur d'ombrage. Ces données sont la Surface de projection du Mirror (la surface effective de projection) (m²) La surface totale du Mirror (m²) et la Réflectivité du miroir. L' « Insolation Cut In » désigne la valeur de rayonnement direct normal au-dessus de laquelle le ventilateur du système de refroidissement fonctionne. Sa valeur est utilisée pour le calcul des pertes parasites.

Le modèle du concentrateur parabolique prédit la puissance radiative intercepté par le récepteur ($P_{in,rec}$) basé sur l'insolation directe normale (DNI), La surface projetée du miroir (A_{proj} ou A_{app}), La vitesse de découpe du vent, le facteur d'interception (ϕ_{int} , ϕ_{fac}) , La réflectivité du miroir (ρ_{ref}) et le facteur d'ombrage (ϕ_{shade}) comme donné par l'équation (3-2) :

$$P_{in,rec} = I_{DNI} \cdot A_{proj} \cdot \rho_{ref} \cdot \phi_{int} \cdot \phi_{fac} \cdot \phi_{shade} \quad 3-2$$

Les valeurs associées aux caractéristiques et performances de notre miroir sont les suivantes :

Mirror Parameters	
Projected Mirror Area	87.7 m ²
Total Mirror Area	91 m ²
Reflectance	0.94 (0..1)

Performance	
Insolation Cut-In	200 W/m ²

Figure 65: Paramètres SAM du concentrateur

3. Récepteur :

La version actuelle des modèles SAM possède un Code pour un Type de récepteur à illumination directe, dans lequel le rayonnement solaire est directement absorbé par les tubes absorbeurs contenant le fluide de travail. C'est le type de récepteur le plus couramment utilisé pour les systèmes de Dish-Stirling.

SAM utilise les paramètres du récepteur pour calculer les pertes thermiques du récepteur, qui représentent généralement plus de 50% des pertes totales du système. D'autres pertes du système comprennent les pertes dus au concentrateur, les pertes d'interception du récepteur, et les pertes de moteur Stirling. Les pertes thermiques du récepteur sont dues à la conduction, la convection et rayonnement.

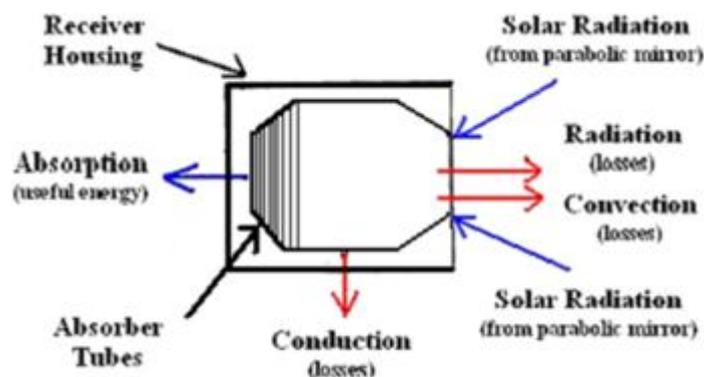


Figure 66: Balance d'énergie dans le récepteur d'un système Dish-Stirling

L'absorbeur est un composant du récepteur qui absorbe le rayonnement solaire et transfère l'énergie thermique au moteur Stirling. L'Aire de la surface de l'absorbeur est utilisée pour calculer la surface de la cavité interne. La surface de la cavité interne est la somme de l'aire de surface de la paroi de la cavité et la surface de l'absorbeur et est utilisée pour calculer les pertes par rayonnement, conduction et convection.

Pour minimiser la conduction dans le boîtier du récepteur, une épaisseur d'isolant de 75 mm a été suggérée comme une largeur effective. Cette épaisseur à été choisie essentiellement en tant que moyen pour réduire à la fois la conduction à travers le boîtier de récepteur, et le facteur d'ombrage du miroir. Les paramètres du récepteur utilisé sont les suivantes :

Aperture	
Receiver Aperture Diameter	0.184 m
Insulation	
Thickness	0.075 m
Thermal Conductivity	0.06 W/mK
Absorber	
Absorber Absorptance	0.9
Absorber Surface Area	0.6 m ²
Cavity	
Cavity Absorptance	0.6
Cavity Surface Area	0.6 m ²
Internal Diameter of Cavity Perp. to Aperture	0.46 m
Internal Cavity Pressure With Aperture Covered	101 kPa
Internal Depth of Cavity Perp. to Aperture	0.46 m

Figure 67: Paramètres SAM du récepteur

4. Moteur Stirling :

Le modèle de moteur Stirling dans SAM est basé sur l'équation de la courbe ajustée de Beale avec correction de la température décrite par Fraser (2008). Le modèle calcule la puissance motrice horaire moyenne de sortie en watts en fonction de l'équation de la courbe ajustée de Beale, l'équation de la courbe ajustée de pression, la cylindrée du moteur et sa vitesse de fonctionnement et la température de l'espace d'expansion (Zone chaude). L'équation de la

courbe ajustée de Beale calcule la puissance de sortie brute du moteur en fonction de la puissance d'entrée calculée par les modèles du collecteur et du récepteur. SAM détermine la température de l'espace de compression à partir de la température ambiante dans le fichier de données de temps.

Les paramètres du moteur sont les suivants :

- Heater Head Set Temperature (K) : la Température de la tête de chauffage
- Heater Head Lowest Temperature : La température la tête de chauffage ayant la plus basse température dans un moteur à plusieurs cylindres.
- Vitesse de fonctionnement du moteur (rpm) La vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement du moteur. Utilisé pour calculer la puissance de sortie du moteur.
- Displaced Volume Engine (m³) : Le volume déplacé par les pistons. Utilisé pour calculer la puissance de sortie du moteur.

Estimated Generation	
Single Unit Nameplate Capacity	25 kW

Engine Parameters	
Heater Head Set Temperature	993 Kelvin
Heater Head Lowest Temperature	973 Kelvin
Engine Operating Speed	1800 rpm
Displaced Engine Volume	0.00038 m ³

Beale Curve Fit Coefficients	
Beale Constant Coefficient	0.04247
Beale First-order Coefficient	1.682e-005
Beale Second-order Coefficient	-5.105e-010
Beale Third-order Coefficient	7.073e-015
Beale Fourth-order Coefficient	-3.586e-020

Pressure Curve Fit Coefficients	
Pressure Constant Coefficient	0.658769
Pressure First-order Coefficient	0.00023496

Figure 68: Paramètres SAM du moteur

5. Parasites :

Les variables d'entrée dans la page Parasites sont utilisées pour calculer la température de l'espace de compression et la consommation électrique des pompes, des ventilateurs de refroidissement, et des commandes de suivi. Les paramètres sont :

Puissance moyenne du système de contrôle parasite

Vitesse de la pompe du système de refroidissement

Vitesse des ventilateurs 1 ,2,3 du système DE Refroidissement

Les températures du fluide de Refroidissement pour le fonctionnement des ventilateurs 1,2,3

Type de fluide de refroidissement

L'efficacité du refroidisseur et du radiateur.

Parasitic Parameters	
Control System Parasitic Power, Avg.	<input type="text" value="150"/> W
Cooling System Pump Speed	<input type="text" value="1800"/> rpm
Cooling System Fan Speed 1	<input type="text" value="400"/> rpm
Cooling System Fan Speed 2	<input type="text" value="550"/> rpm
Cooling System Fan Speed 3	<input type="text" value="650"/> rpm
Cooling Fluid Temp. For Fan Speed 2 Cut-In	<input type="text" value="20"/> °C
Cooling Fluid Temp. For Fan Speed 3 Cut-In	<input type="text" value="30"/> °C
Cooling Fluid Type	<input type="text" value="Water"/> 
Cooler Effectiveness	<input type="text" value="0.6"/> (0..1)
Radiator Effectiveness	<input type="text" value="0.6"/> (0..1)
'b_cooler' Parameter	<input type="text" value="0.7"/>
'b_radiator' Parameter	<input type="text" value="0.7"/>

Figure 69: Paramètres SAM des parasites

6. Financement :

Comme évoqué précédemment, SAM présente plusieurs modèles de financement du projet. Pour le modèle Utilitaires IPP des producteurs d'énergie indépendants et les projets PPA commerciaux SAM offre deux modes de solutions :

• Soit on Indique l'IRR cible, ce qui nous permet de spécifier le taux de rendement interne

(IRR) en entrée, et SAM utilise un algorithme de recherche pour trouver le prix PPA nécessaire pour atteindre l'objectif IRR.

• Soit on Indique le Prix PPA ce qui nous permet de spécifier le prix PPA en entrée, et SAM calcule le taux de rendement qui en résulte.

Notre simulation se fera en indiquant un taux de rendement interne (IRR) de 15% et Le Nombre d'années couvertes par La simulation sera de 25 ans.

Les autres paramètres sont spécifiques aux taxes des états américains, aux prêts de la banque pour la mise en place du projet aux couts des terrains, de la technologie et des couts de maintenance. Nous ne modifierons pas ces paramètres car les uns sont des paramètres spécifiques à chaque modèle de technologie (couts du moteur, du concentrateur de la maintenance etc.) et les autres n'auront aucune incidence sur les résultats qui nous intéressent.

Direct Capital Costs					
Site Improvements	900000	m2	20.00	\$/m2	\$ 18,000,000.00
Collector Cost (Projected Area)	87.7	m2/unit	400.00	\$/m2	\$ 140,320,000.00
Receiver Cost	25	kW/unit	225.00	\$/kW	\$ 22,500,000.00
Engine Cost	25	kW/unit	550.00	\$/kW	\$ 55,000,000.00
Contingency			7 %		\$ 16,507,400.00
Total Direct Cost					\$ 252,327,400.00

Indirect Capital Costs					
Total Land Area	222	acres	Nameplate	25	kWe
	Cost per acre	% of Direct Cost	Cost per Wac	Fixed Cost	Total
EPC and Owner Cost	\$ 0.00	11 %	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 27,756,014.00
Total Land Cost	\$ 10,000.00	0 %	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 2,223,948.43
Sales Tax of	5 %	applies to	80 %	of Direct Cost	\$ 10,093,096.00
Total Indirect Cost					\$ 40,073,058.43

Total Installed Costs	
Total Installed Cost excludes financing costs (if any, see Financing Page)	Total Installed Cost \$ 292,400,458.43
	Total Installed Cost per Capacity (\$/kW) \$ 2,924.00

Figure 70: Paramètres SAM des couts d'installation

IV. Simulation et résultats :

Pour notre étude, nous avons choisis deux modèles de systèmes de Dish-Stirling de deux différentes sociétés de développement de la technologie : Le système Dish Stirling du SES (Stirling Energy system) doté du moteur 4-95 de type cinématique, possédant 4 cylindres et dont le liquide de travail est l'hydrogène. Le deuxième est le système du WGA pour le projet ADDS , (Advanced Dish Development System) muni du moteur Stirling (SOLO 161) dont le liquide de travail est le dihydrogène.



Figure 72: Système SES



Figure 71: Système WGA

	Variables	SES	WGA-ADDs
Concentrateur	Surface de projection du Miroir (m ²)	87.7	41.2
	Surface totale du miroir (m ²)	91.0	42.9
	Réfectivité (0...1)	0.94	0.94
	Réduction de l'ensoleillement (W/m ²)	200	275
	Facteur d'interception (0...1)	0.995	0.998
	Distance focale du miroir (m)	7.45	5.45

Récepteur	Diamètre d'ouverture du Récepteur (m)	0.184	0.14
	Épaisseur de l'isolant (m)	0.075	0.075
	Conductivité thermique de l'isolant (W/mK)	0.06	0.06
	Absorption de l'absorbeur	0.9	0.9
	Surface de l'absorbeur (m ²)	0.6	0.15
	Absorption de la cavité	0.6	0.6
	Surface de la cavité (m ²)	0.6	0.15
	Diamètre interne de la cavité perpendiculairement a l'ouverture (m)	0.46	0.35
	Pression interne de la cavité lorsque l'ouverture est fermée (kPa)	101	101
	Profondeur interne de la cavité perpendiculairement a l'ouverture (m)	0.46	0.35
Moteur Stirling	Capacité nominale d'une unité (kW)	25	10
	Température de la tête de chauffage (K)	993	903
	Température de la tête de chauffage la plus froide (K)	973	903
	Vitesse de fonctionnement du moteur (Tr/min)	1800	1800
	Volume déplacés par les pistons (m ³)	0.00038	0.00016

Tableau 9 : Caractéristiques techniques des deux systèmes Dish-Stirling SES et WGA

1. Simulation des performances :

Le rendement global du système dépend du rendement de chaque composante. Le rendement global s'écrit [27] :

$$\eta = \eta_C \eta_R \eta_{Stir} \eta_{Gen} = \frac{P}{A_c I}$$

Avec :

η_C : Rendement du concentrateur

η_R : Rendement du récepteur

η_{Stir} : Rendement du moteur Stirling

η_{Gen} : Rendement du générateur

P : Puissance Brut généré

A_c : Surface projetée du concentrateur

I : Radiation normale directe

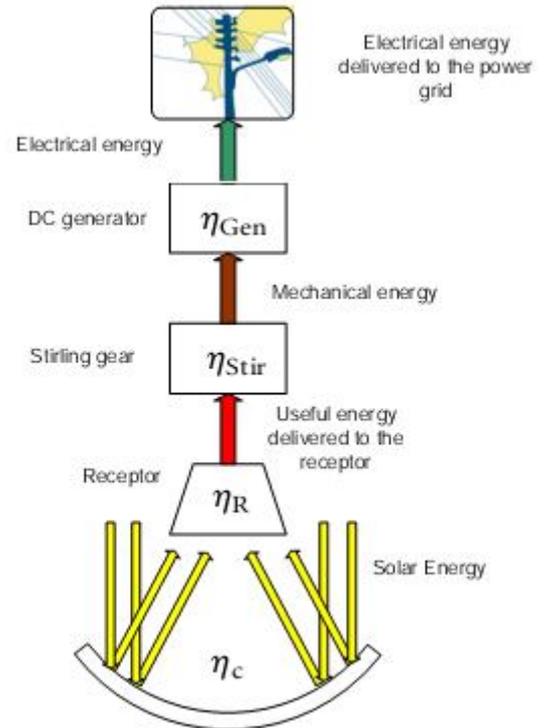


Figure 73: Rendement du système Dish-Stirling [27]

Comme on peut le voir dans les graphiques ci-dessus, le flux annuel d'énergie est fonction de la puissance totale de champ de chaque composante du système et les pertes qui surviennent lors du transfert d'énergie entre chaque composante.

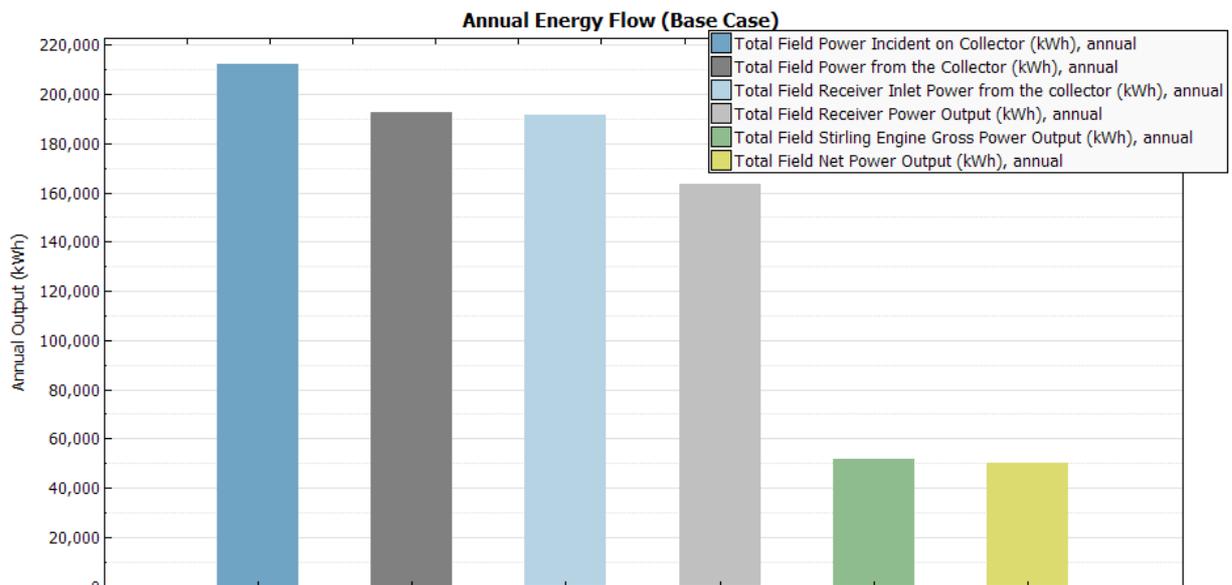


Figure 74: Flux Annuel d'énergie pour chaque composant du système

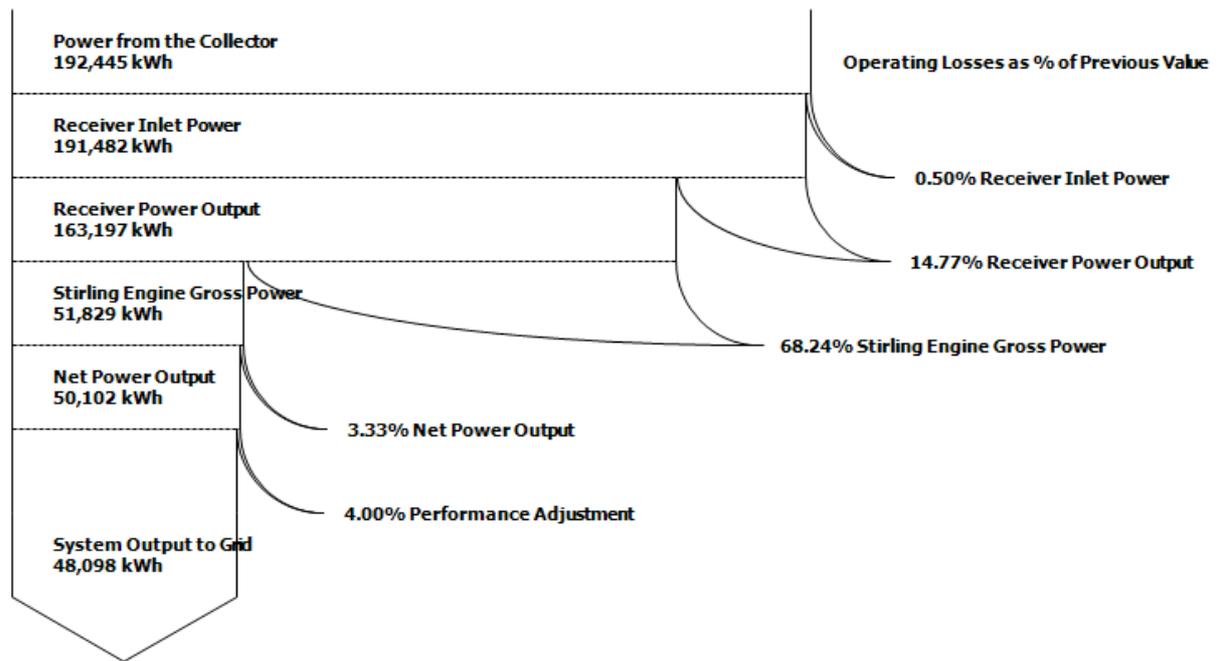


Figure 75: Diagramme des pertes de puissance

Le concentrateur absorbe 89.5% de la puissance incidente totale annuel. Cette puissance est ensuite transférée à travers le récepteur vers le moteur Stirling qui en perd 68.24%. Afin de comprendre le rôle de chaque composante et son influence sur le rendement totale, nous proposons une étude des performances sur les différents paramètres variables du système en se basant sur l'étude technique et l'étude des performances effectués précédemment.

Ainsi, pour vérifier les conclusions tirées lors de notre analyse technique du système Dish-Stirling dans le chapitre 4, nous allons nous servir du logiciel SAM et changer certains des paramètres pertinents conclus par l'étude des performances pour vérifier leur influence sur l'efficacité du système. Nous procéderons sur une seule unité du système SES d'une puissance unitaire de 25kW.

Dans la simulation, nous avons joué sur les paramètres du concentrateur, du récepteur et des systèmes de refroidissement. Nous ne pouvons pas changer les paramètres du moteur Stirling car ces derniers sont liés aux coefficients de Beale que nous ne pouvons calculer. De plus, d'autres paramètres plus importants liés au rendement du moteur ne sont pas mentionné sur SAM (puisque il utilise des modèles de moteurs existants). D'après l'étude technique que nous avons déjà faite, nous savons donc que ces paramètres sont le dimensionnement du moteur, la

variation de pression du gaz de travail ou la variation de la course du piston. Dans les deux cas cela conduit à des solutions relativement complexes.

En se basant sur l'étude des performances, nous choisissons les paramètres à changer et nous expliquerons les résultats obtenus grâce à l'étude technique du système.

Les paramètres sur lesquels nous avons choisis d'agir sont :

- DNI (I_b, n et θ_i) : Insolation déterminé par l'emplacement géographique
- A_{app} et E : Déterminés par la surface totale et la surface d'ouverture du concentrateur sur SAM
- ρ : réflectivité du miroir
- A_{rec} : Déterminé par le diamètre d'ouverture du récepteur et des dimensions de la cavité
- α : Déterminé par la capacité d'absorption du récepteur
- $P_{parasitics}$: les puissances parasites.

1.1 Influence de la radiation normale directe

La radiation normale directe (DNI) dépend de l'emplacement et détermine les paramètres I_b , n et θ_i qui augmentent le rendement du système (ce qui réduit le coût par la même occasion (Figure 79)). Nous avons choisis un deuxième site en plus de celui de Tonopah qui est Philadelphia (DNI : 1348.7kWh/m²) et dont les paramètres météorologiques et solaires se rapprochent de ceux des villes côtières marocaines (Rabat, Casablanca) :

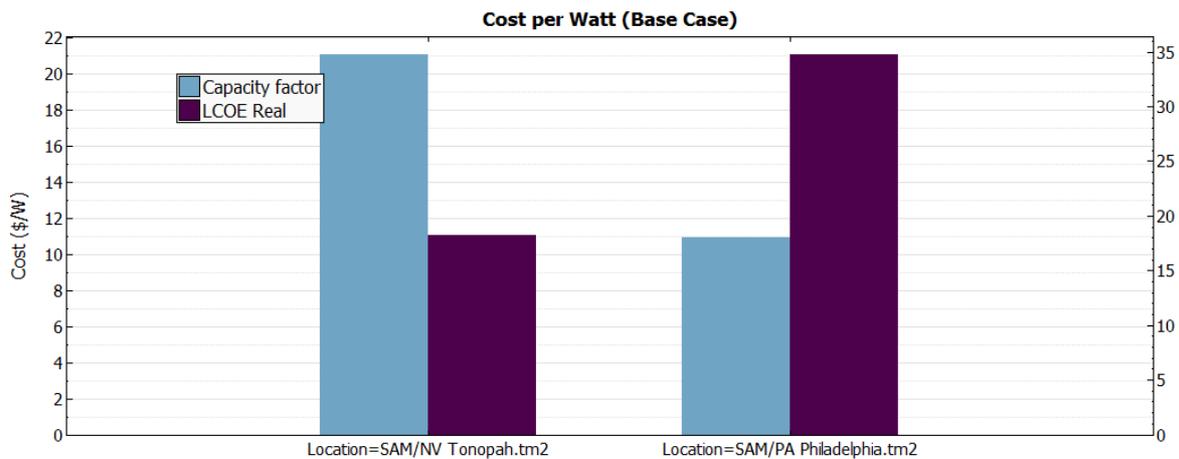


Figure 76 : effet de la localisation donc DNI sur l'efficacité du système et du coût LCOE

1.2 Influence du concentrateur :

- *Influence de la surface totale :*

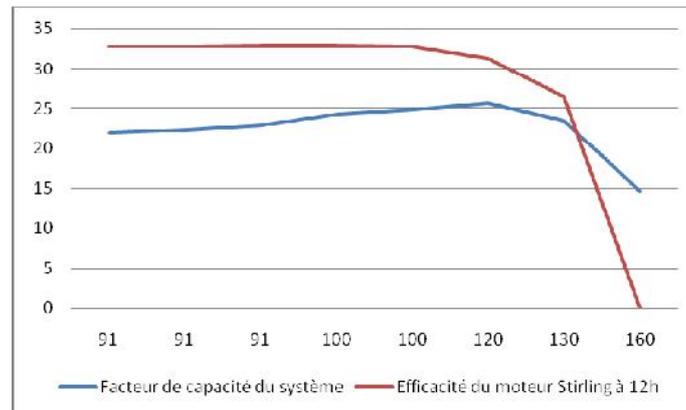


Figure 77 : Efficacité du système et du moteur en fonction de la surface totale du miroir

Le système produit plus d'énergie lorsque le miroir est plus grand (ce qui augmente l'air d'ouverture ou de projection du miroir). Bien que l'efficacité du moteur n'augmente que d'à peu près 0.03% à chaque augmentation de la surface de projection du miroir et de presque 0.1% pour chaque augmentation de la surface totale du miroir, ces augmentations s'accompagnent de pertes thermiques au niveau du récepteur et du moteur, qui deviennent importantes dès que l'on dépasse une surface de 100 m² (Figure 80). Nous expliquons cela par le fait que les composants au niveau du moteur ne supportent pas les températures plus élevées que l'on obtient grâce à un concentrateur plus grand. Vu que les pertes sont plus significatives au niveau du moteur, nous pouvons supposer, selon l'étude technique du moteur Stirling au chapitre 4, que les résultats sont dus à la dégradation des propriétés des matériaux au niveau du régénérateur et des pistons.

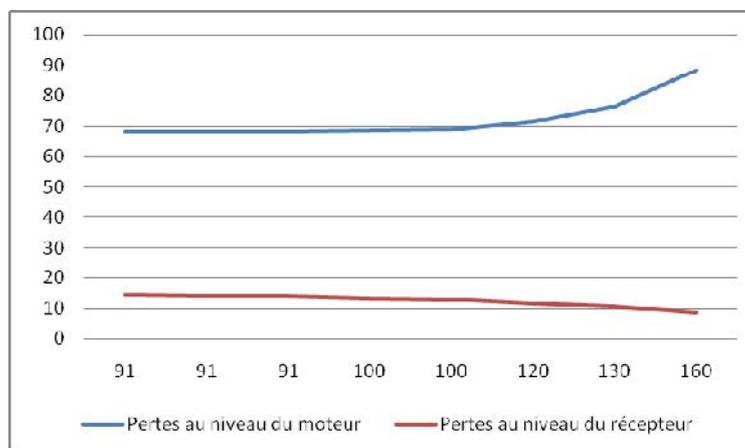


Figure 78 : Pertes au niveau du moteur et du récepteur en fonction de la surface totale du miroir

- *Influence de la réflectivité ρ :*

Réflectivité ρ	Énergie annuelle	Facteur de capacité du système*	Efficacité du moteur à 12h
0.8	39356	18	32.5
0.94	48098	22	32.8
0.99	50924	23.3	32.9

Tableau 10: Influence de la réflectivité sur les différentes valeurs du système

*Le facteur de capacité est le ratio de la valeur électrique de sortie du système prédite dans la première année de fonctionnement de la sortie nominale, ce qui équivaut à la quantité d'énergie que le système produirait si elle fonctionne à sa capacité nominale pour chaque heure de l'année. [SAM - help]

$$\text{Capacity Factor} = \text{Net Annual Energy (kWhac/yr)} / \text{System Capacity (kWdc or kWac)} / 8760 \text{ (h/yr)}$$

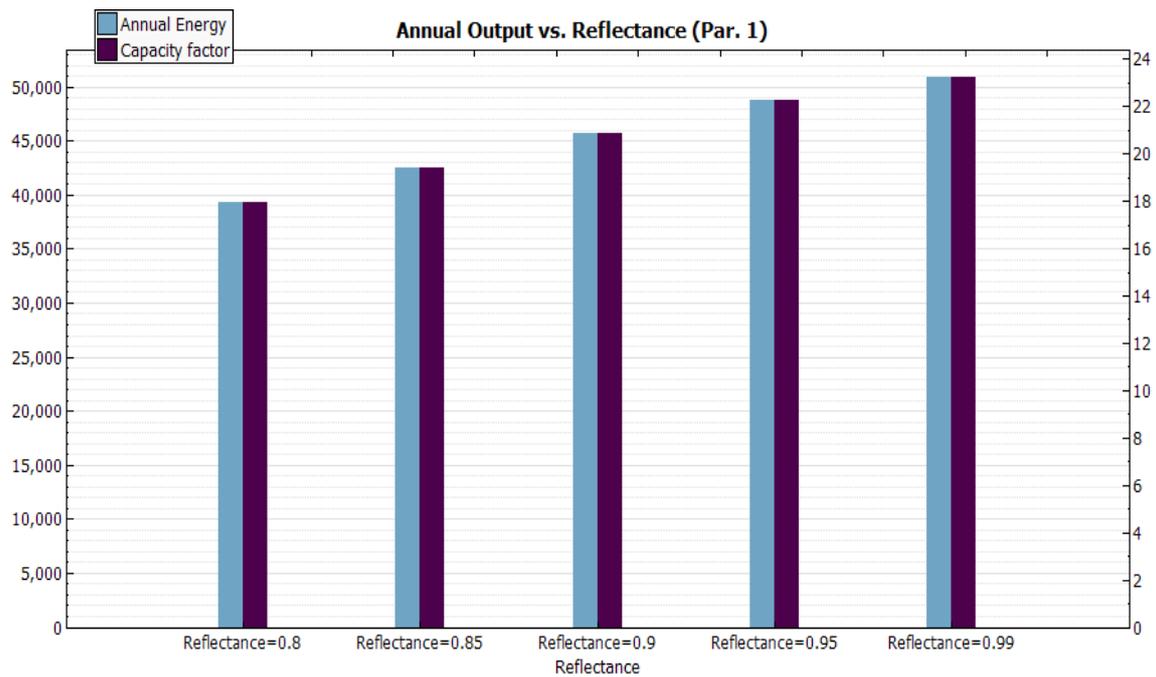


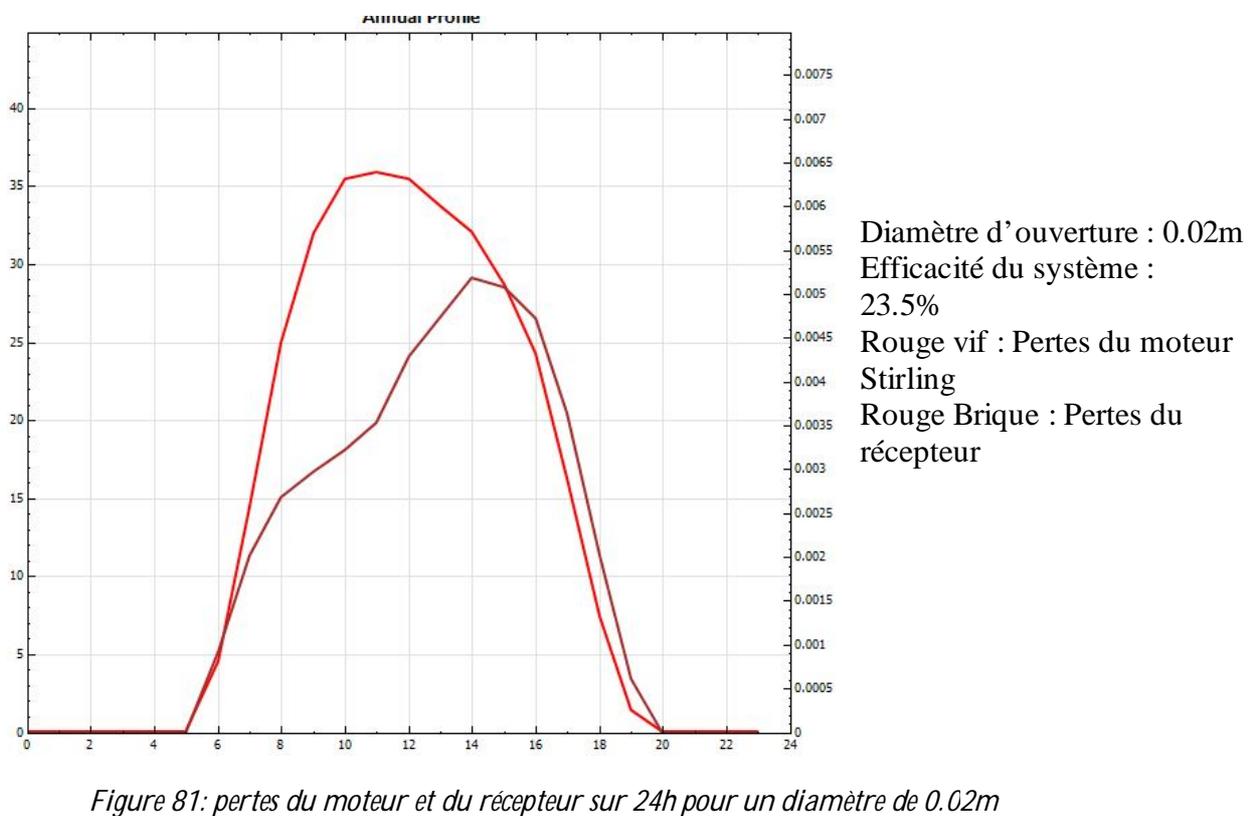
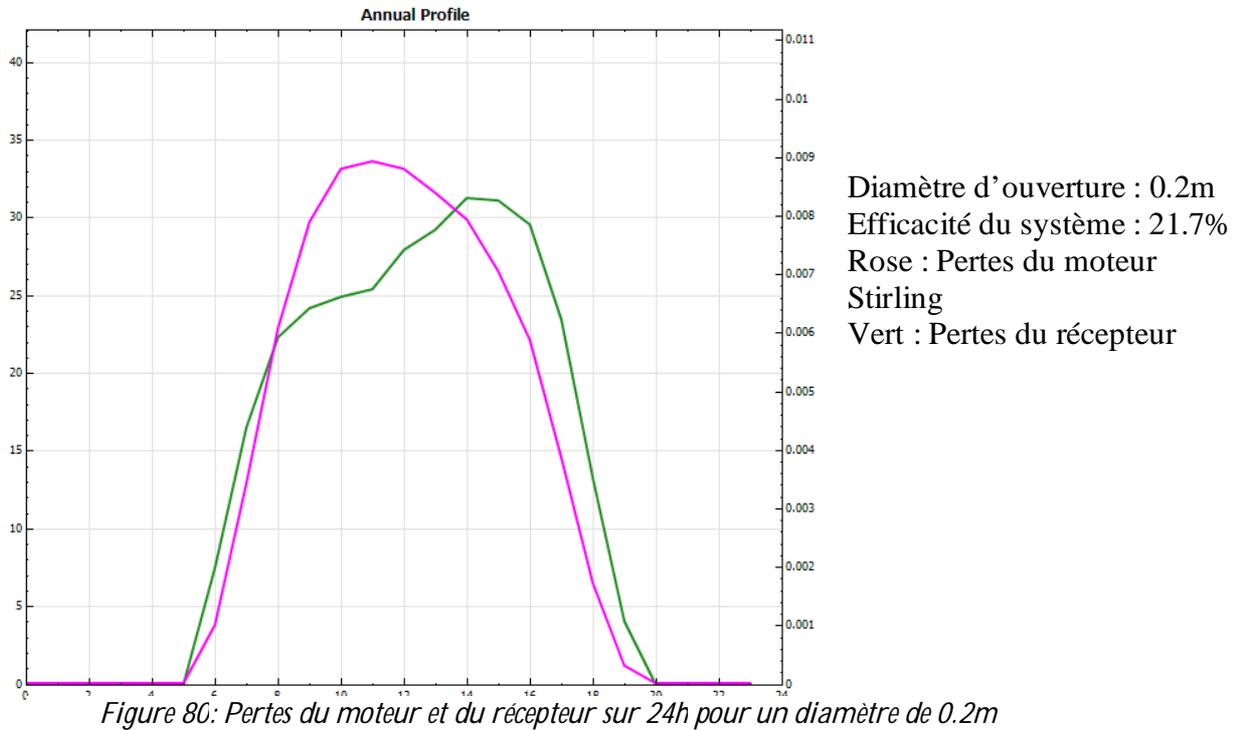
Figure 79: Sortie annuel d'énergie et facteur de capacité annuel en fonction de la réflectivité

De la même manière, l'augmentation de la réflectivité du matériau dont est composé le concentrateur influe sur les résultats de façon positive et permet un meilleur rendement du système. La réflectivité optimale que l'on peut atteindre actuellement est de 0.94%.

1.3 Influence du récepteur :

- **Influence du diamètre d'ouverture :**

Ces deux graphiques représentent les pertes du moteur et du récepteur dans une période de 24h pour deux valeurs de diamètres différents :



Lorsqu'on a augmenté le diamètre d'ouverture du récepteur de 0.02 m à 0.184 à les pertes au niveau du moteur Stirling ont augmentées. Mais lorsqu'on l'a encore augmenté jusqu'à 0.2m, les pertes ont diminuées.

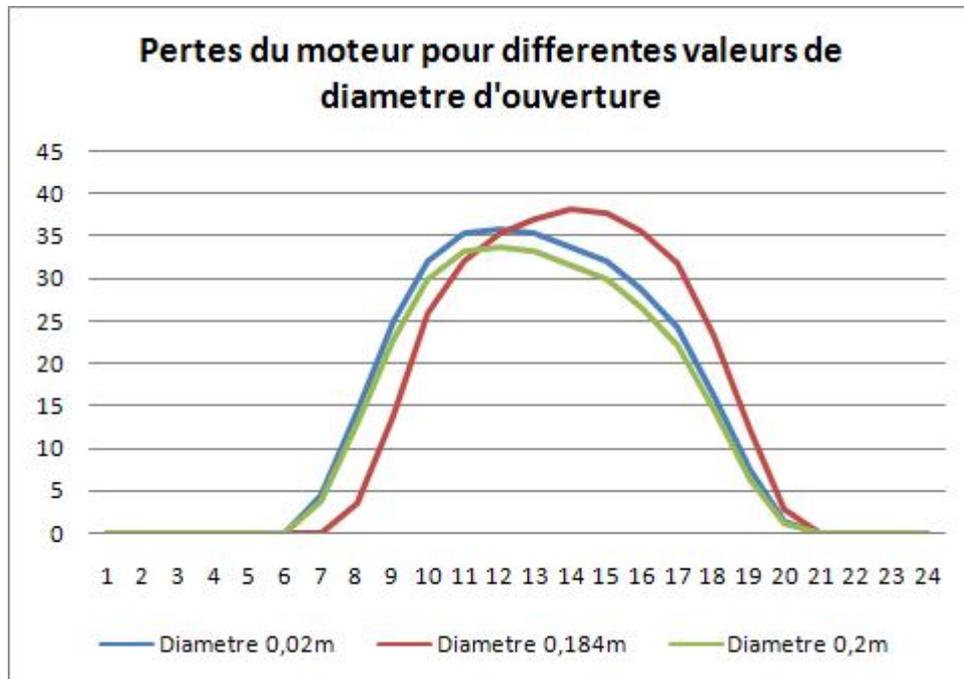


Figure 82: Pertes du moteur pour différentes valeurs de diamètres d'ouverture

De la même manière, l'efficacité du récepteur augmente lorsqu'on agrandi l'ouverture mais diminue des qu'on dépasse la valeur optimale :

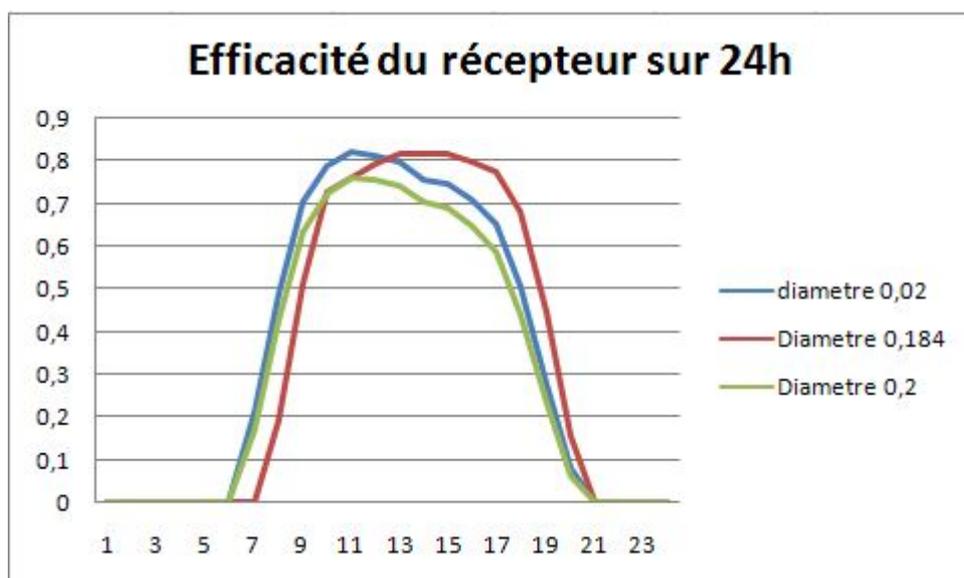


Figure 83: Efficacité du récepteur sur 24h pour différentes valeurs de diamètre d'ouverture

Ces résultats s'expliquent par ce qui a été étudié précédemment dans la partie récepteur (chapitre III, 3) : l'ouverture doit être assez grande pour admettre le maximum de rayons réfléchis mais assez petite pour limiter le rayonnement et les pertes par convection.

- *Influence de l'absorption :*

Absorbance de la cavité	Facteur de capacité du système	Absorbance de l'absorbeur	Facteur de capacité du système
1	22.1%	2	22.3%
0.6	22%	0.9	22%
0.3	20.6%	0.2	21.3%

Tableau 11: Influence de l'absorption sur différentes valeurs du système

Plus l'absorbance augmente, plus l'efficacité du système est grande car les pertes diminuent et la quantité de rayons réfléchis absorbés est importante.

- *Influence des dimensions de la cavité :*

Diamètre de la cavité	Facteur de capacité du système	Profondeur de la cavité	Facteur de capacité du système	Surface de la cavité	Facteur de capacité du système
0.1	21.8%	0.1	22%	0.8	21.5
0.46	22%	0.46	22%	0.6	22.8
1	22.3%	1	22%	0.2	22

Tableau 12: Influence des dimensions de la cavité sur différents valeurs du système

Le diamètre de la cavité influe sur l'efficacité du système ; cette dernière augmente tant que l'on agrandi le diamètre de la cavité car il y'a plus de rayons réfléchis tandis que la profondeur de la cavité n'a aucune influence sur l'efficacité.

La surface de la cavité est quant à elle le siège de pertes thermiques qui diminuent l'efficacité lorsqu'elle dépasse une valeur optimale de 0.6 m.

1.4 Influence des puissances parasites :

Les paramètres significatifs sur lesquels on peut agir sur le logiciel SAM en ce qui concerne les puissances parasites sont l'efficacité des et les efficacités du refroidisseur (système de ventilation) et du radiateur.

Les résultats sont, comme prévus, l'augmentation de l'efficacité du système lorsque les puissances parasites diminues grâce a l'efficacité des systèmes de refroidissement.

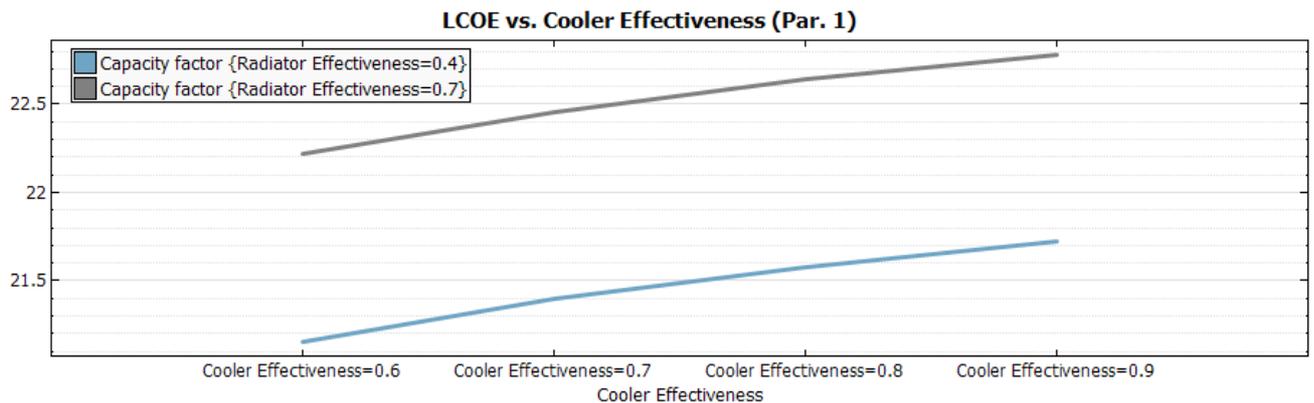


Figure 84: Influence de l'efficacité du refroidissement et du radiateur sur l'efficacité du système

Ces derniers permettent une température de la source froide plus basse, donc une différence de température significative d'où une vitesse du moteur Stirling plus grande et donc au final, une production d'électricité importante :

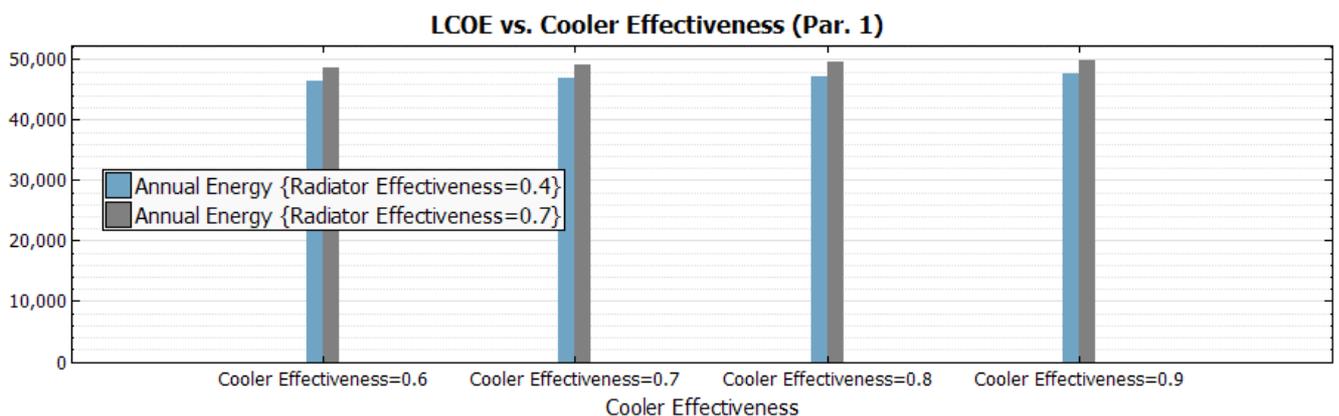


Figure 85: Influence de l'efficacité du refroidissement et du radiateur sur l'énergie annuel produite

2. Simulation des coûts

Nous comparerons le cout des deux systèmes SES et WGA et d'un simple système de panneaux photovoltaïque pour la même puissance délivré de 1MW et pour les paramètres optimaux. Le liquide de refroidissement est l'eau la période d'analyse s'étale sur 25 ans et les paramètres d'entrées financiers sont les mêmes et les couts sont en dollars.

2.1 Coûts du système Dish-Stirling :

	WGA	SES
Nombre d'unités	100	40
Cout Concentrateur	1 648 000 \$	1 403 200 \$
Cout du récepteur	225 000\$	225 000 \$
Cout du moteur Stirling	550 000 \$	550 000 \$
Totale des couts directs	3 074 110 \$	2 865 674 \$
Totale des couts indirects	516 715,21 \$	491 627,45 \$
Cout total de l'installation	3 590 825,21 \$	3 357 301,45 \$
Cout total de l'installation par capacité (\$/kW)	3 590,83	3 357,30

Tableau 13: Coûts des systèmes SES et WGA

La même puissance produite de 1MW implique, pour le système WGA qui ne délivre que 10kw par unité, plus d'unité de production qui s'élève à 100 contre 40 pour le SES et donc un champ solaire plus grand. Ce qui explique les couts indirects plus élevés. Le système SES quant à lui possède des concentrateurs d'un plus grand diamètre, ce qui implique une distance de séparation plus importante (25m contre 15 m pour le système WGA) afin de réduire l'ombrage.

Au final, pour une même puissance produite, le système WGA coute plus cher au niveau des collecteurs puisque les prix du récepteur et du moteur Stirling sont les même, c'est le cout du concentrateur et la surface utilisé (très grande vu le nombre importants d'unités) qui font la différence, comme l'illustre le diagramme ci contre :

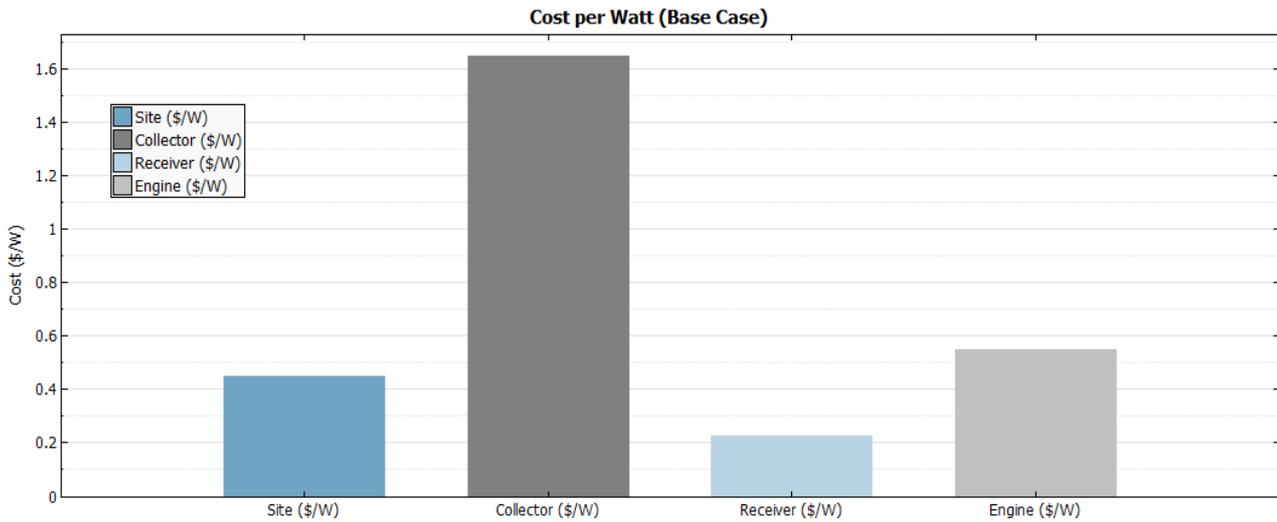


Figure 86: Coûts par watt pour chaque composant du système WGA

Dans le système Dish-Stirling c'est le concentrateur qui représente les coûts les plus élevés, puis le moteur Stirling. Pour une installation photovoltaïque, (dont le coût total est de 3,705,276.12\$ donc plus cher que le Dish-Stirling) le coût le plus élevé est celui des modules photovoltaïques, puis les différentes installations et équipement et la préparation du terrain liés à l'installation de la centrale.

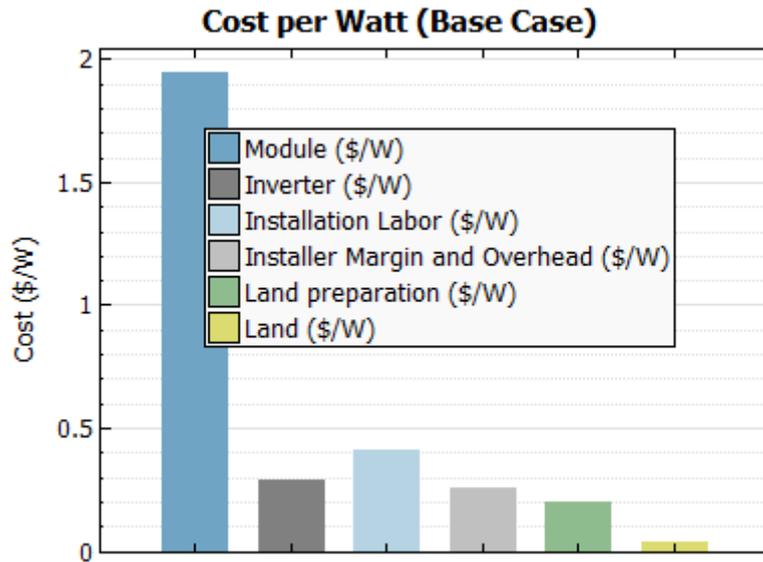


Figure 87: Coûts par watt pour chaque composant d'un système photovoltaïque

3. Résultats du LCOE :

Déjà définis précédemment, le LCOE ou LEC nous permettra de connaître le prix de revient du kWh à base du système Dish-Stirling.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Coût de production d'énergie actualisé}}{\text{Quantité d'énergie produite actualisée}}$$

La simulation des systèmes Dish-Stirling et photovoltaïque sur SAM nous donne le résultat suivant :

	WGA PROJECT	SES PROJECT
Annual Energy	1,733,920 kWh	1,870,153 kWh
LCOE Real	20.37 ¢/kWh	17.97 ¢/kWh
Capacity Factor	19.8 %	21.3 %

Ce dernier montre que le prix de revient du kWh à base du système Dish-Stirling SES est plus intéressant que le système WGA mais reste plus cher que le prix de revient du photovoltaïque qui est de l'ordre de 13 ¢/kWh. La production annuel d'énergie par le Dish-Stirling est plus grande et le prix plus bas des que le système que l'on utilise est performant. Par exemple, dans le graphe ci-dessous, en ne diminuant que le diamètre d'ouverture de 0.184 a 0.02 m , le facteur de capacité augmente de 21.3 a 22.6% et on arrive a diminuer le prix de 17.97 à 16.98 cent le kWh. Aussi, le système serait moins cher dans les endroits à fort DNI.

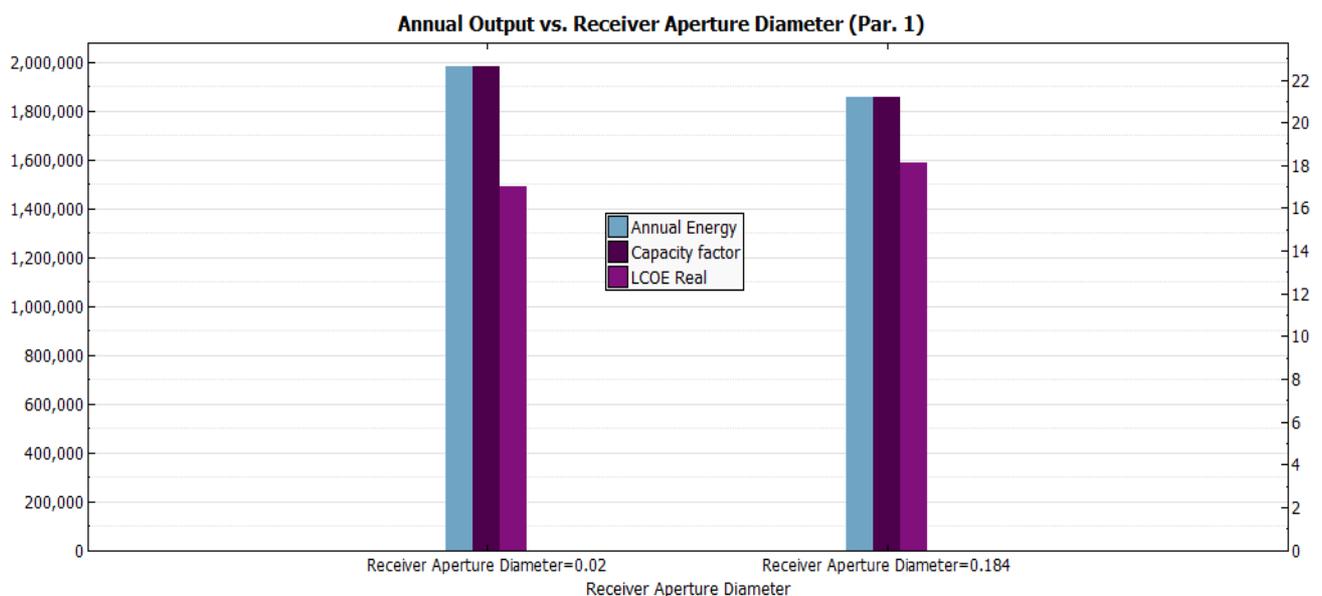


Figure 88: Variation de l'énergie annuelle le facteur de capacité et le LCOE par la variation du diamètre d'ouverture du récepteur

Il apparait donc que le système Dish-Stirling pourrait avoir un intérêt économique ne serait-ce que sur les coûts de fonctionnement et de maintenance si seulement il était produit à plus grande échelle et par plusieurs entreprises (afin de faire baisser son prix du fait de la concurrence).

Ainsi, selon une étude économique réalisé par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique CNRST de Rabat [28], le prix de l'énergie électrique produite à partir du Dish-Stirling est compétitif vis-à-vis du photovoltaïque pour une même production annuelle du système et le prix de revient du kWh à base de ce système serait de l'ordre de la moitié de celui du photovoltaïque si la production est soutenue. Malheureusement, à l'heure actuel, le marché du Dish-Stirling est encore à son commencement et les prix restent supérieurs à ce que le marché propose entre le photovoltaïque et le cylindro-parabolique.

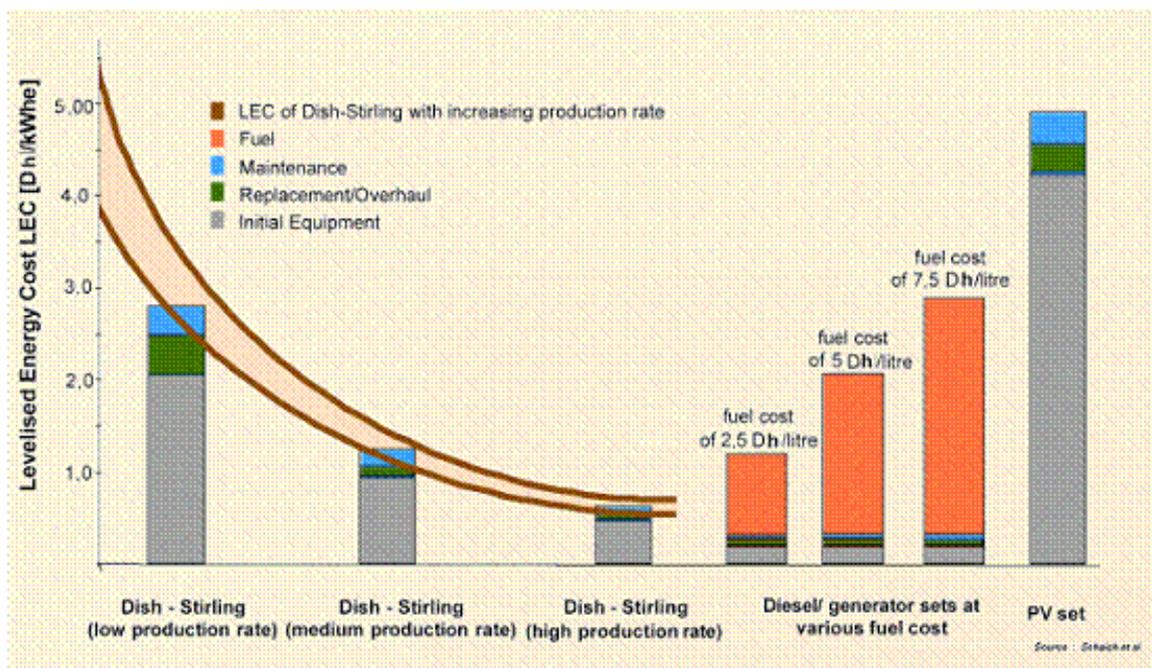


Figure 89 : Comparaison des coûts du système Dish-Stirling [28]

V. Conclusion :

Dans ce projet de fin d'étude, l'étude de la technologie Dish-Stirling a consisté en une étude comparative, une étude technique et une simulation des performances et des coûts qui ont permis de mettre la lumière sur les différents problèmes qui entrave le développement de la technologie malgré des avantages importants.

L'étude comparative a permis de positionner le Dish-Stirling dans le cadre de ses potentialités et a démontré qu'il se distingue des autres technologies solaires par :

- un rendement plus élevé,
- une consommation d'eau plus faible,
- une moindre emprise au sol pour une puissance unitaire élevée (jusqu'à 50kw),
- une adaptabilité à tout les types de terrains,
- une simplicité d'installation qui ne nécessite pas de main d'œuvre qualifié.

Néanmoins, ces points positifs sont contrés par plusieurs points :

- difficulté de développer un système de stockage qui fait la force de la tour solaire et du cylindro-paraboliques,
- besoin en rayonnement directe ce qui limite les régions dans lequel il peut être utilisé efficacement,
- un marché qui est encore a ses débuts.

Pour mieux comprendre d'où le Dish-Stirling tiens ses avantages et ses inconvénients, nous avons dus effectuer une étude technique de l'organe de puissance du système : Le moteur Stirling. Après avoir compris son fonctionnement et ses particularités et avoir analysé les différentes équations qui régissent son fonctionnement, il nous est apparu que le moteur Stirling est le moteur le plus attractif qui soit en termes de rendement énergétique en plus d'avoir des configurations multiples et malléables qui offrent beaucoup de possibilités au niveau de l'utilisation et de la puissance. Malheureusement, il souffre de plusieurs problèmes techniques au niveau du régénérateur, des volumes mort, du fluide du travail, des pertes thermiques et mécaniques etc. qui rendent son rendement réel faible par rapport son rendement théorique, un rendement théorique égale au rendement de Carnot. Ces problèmes techniques ne sont pas insurmontable, vu les moyens de recherche et de développement dont

on dispose et l'existence des moteurs Stirling à usage militaire prouvant qu'il est simplement freiné par le peu d'applications en grande série, ce qui semble changer avec le développement du Dish-Stirling.

Ensuite, L'étude et la simulation des performances par le logiciel SAM a démontré que, bien que les pertes thermiques les plus importantes se situent au niveau du moteur Stirling, le rendement total du système est influencé par le rendement des autres composants. Ainsi, en optimisant les propriétés du miroir ou du récepteur ou simplement les données climatiques en choisissant le meilleur emplacement (DNI élevé), le rendement augmente. L'augmentation des puissances avec la température de la source chaude n'est pas limitée. Cependant cette progression est assurée par des matériaux qui résistent aux températures élevées sinon les pertes thermiques deviennent considérables.

La simulation des couts à finalement permis de prédire des coûts d'investissement et des coûts de production d'électricité de deux systèmes ayant des caractéristiques techniques différentes. Le résultat est que la valeur du LCOE pour un système SES plus performant et produisant plus d'énergie annuel est plus intéressante mais que les coûts initiaux de ces systèmes sont encore un obstacle à leur entrée sur le marché.

En conclusion, l'étude de faisabilité de ce projet a permis de prouver que le projet d'introduction de la technologie Dish-Stirling en tant que centrale solaire de production d'électricité à grande échelle n'est, à l'heure actuel, pas pertinente vu les nombreuses technologies solaires à des rendements certes plus faibles mais à moindre cout. Le Dish-Stirling reste une technologie à développer tant au niveau technique qu'au niveau commerciale.

L'utilisation la plus pertinente que l'on pourrait proposer pour des projets solaires de Dish-Stirling est une utilisation unitaire. En effet, grâce à son adaptabilité à tous les types de terrains et à son peu de demande au niveau de la surface d'installation, il pourrait substituer les groupes électrogènes de production décentralisée d'électricité dans les régions défavorisé du. Le besoin est de quelques centaines de kWh/jour au plus pour l'éclairage, les télécommunications et les activités artisanales et/ou agricoles. La consommation est principalement en dehors des heures d'enseillement et le Dish-Stirling permet l'hybridation,

ce qui pourrait palier au besoin de stockage. Il pourrait non seulement alimenter en électricité mais aussi être utilisé pour le pompage par énergie solaire. Il permettrait ainsi d'améliorer les conditions de vie des populations vivant dans les zones isolées non encore connectées au réseau électrique.

Bibliographie :

- [1] Document : « *L'énergie solaire thermique à concentration* » – Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie IEPF-2004
- [2] Document : « *Électricité solaire thermodynamique : Valoriser le potentiel méditerranéen* » ESTELA (Association Européenne de l'Électricité Solaire Thermodynamique à Concentration)-2009
- [3] Article : « *L'énergie solaire électrique : grands projets et perspectives* » M. Arkoub and R. Alkama - Revue des Energies Renouvelables -Vol. 12 N°4 641 – 648 - 2009
- [4] Rapport :« *Les Centrales Solaires à Concentration* »-Quoilin Sylvain Université de Liège Faculté des sciences appliquées-2007
- [5] Thèse : « *Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé* »- François Veynandt : INP Toulouse -2011
- [6] Rapport: « *Concentrated Solar thermal power – now!* » Georg Brakmann , Rainer Aringhoff Dr. Michael Geyer Sven Teske - September 2005
- [7] Document : « *Stirling System Description Structural* » Consulting Engineers EuroDish –Schlaich Bergemann und Partner GbR -2001
- [8] Technical report: « *A compedium of Solar Dish-Stirling technology* » William B. Stine and Richard B. Diver-1994
- [9] Rapport : Kee S. Moon, Ph.D J. Miller, Ph.D. « *Stirling Solar Engine Design Report* » San Diego State University-2009
- [10] Rapport : NERL Report « *Solar Dish Engine* » -2006
- [11] Thèse : « *Optimized Bands: A New Design Concept for Concentrating Solar Parabolic Mirrors* » -Lifang Li- ASME School of Mechatronics Engineering Harbin Institute of Technology-2011
- [12] Article : « *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*»-Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli,Karen Abrinia, Ahmad Sharifi Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 - 2009
- [13] Rapport : « *SOLAR ENERGY CONVERSION AND PHOTOENERGY SYSTEMS – High Temperature Solar Concentrators* » Robert Pitz-Paal - Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)-2007
- [14] « *Simple Method s to Approximate CPC Shape to Preserve Collection Efficiency* » Research Article David Jafrancesco, Elisa Sani, D niela Fontani, Luca

- Mercatelli, Paola Sansoni, Annalisa Giannini, and Franco Francini Italian: National Institute of Optics , CNR-INO-2012
- [15] Livre en ligne : «*Power From The Sun* » William B. Stine and Michael Geyer at www.powerfromthesun.net/book.html 2012
- [16] Rapport : «*Stirling engine* »-MAIER Christoph ,GIL Arnaud ,AGUILERA Rafael ,SHUANG Li , YU Xue- UNIVERSITY OF GÄVLE -2007
- [17] Rapport : «*Advanced CSP Teaching Materials* » Matthias Günther , Reza Shahbazfar Chapter 7 Solar Dish Technology German Aerospace Center (DLR)-2011
- [18] Document : «*Centrales solaires thermodynamiques* » Préparation de la feuille de route Energie solaire – Maroc Oriental Frédéric SIROS-2009
- [19] Article : «*Stirling Cycle Machine Analysis* » Russ College of Engineering and Technology Ohio university at www.ohio.edu/mechanical/stirling/me422.html 2011
- [20] Article : «*Optimization of Stirling Engine Power Output Through Variation of Choke Point Diameter and Expansion Space Volume* » Anna Brill Massachusetts Academy of Math and Science-2012
- [21] Rapport : «*Évaluation des capacités de transfert thermique en écoulements oscillant dans des machines écologiques : Application au moteur Stirling*» -Iskander TLILI, Youssef TIMOUMI and Sassi BEN NASRALLAH -Laboratoire d'Étude des Systèmes Thermiques et Énergétiques École Nationale d'Ingénieurs de Monastir. Tunisie
- [22] Document : «*Analyse du cycle de Stirling convenant aux vrais moteurs* »- Serge Klutchenko.2010
- [23] Article : «*Représentation Énergétique Macroscopique (REM) d'un moteur Stirling en vue d'une hybridation thermique* »- Charly GAY, François LANZETTA, Daniel HISSEL, Michel FEIDT-2012
- [24] Rapport Colloque : «*Étude expérimentale de matériaux de régénérateurs de moteurs Stirling afin d'optimiser leur fonctionnement* » - Fethi ALOUI, Ramla GHEITH - 2012
- [25] Rapport : «*Solar South Africa Conference* » Ennex developement-2011
- [26] Rapport : «*Stirling Energy Systems* », Inc. Solar Dish Stirling Systems Report For NREL CSP Technology Workshop March 7, 2007

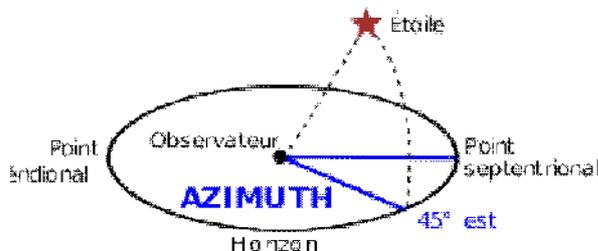
- [27] Rapport : « *Efficiency evaluation and economic feasibility of small Dish-Stirling power systems in Brazil* » Wilson N. Macêdo, João T. Pinho, Marcelo P. Almeida, Aimé F. C. Pinto Neto, Alex R. A. Manito 2006
- [28] Rapport : « *Potential of the Dish-Stirling technology introduction in Morocco* » R. BENCHRIFA D. ZEJLIET, A. BENNOUNA, G. KNIES- *Forum international sur les énergies renouvelables- 2002*

Annexes :

A1 : Complément d'informations sur la course du soleil :

La position du soleil change au fil de la journée (en fonction de la rotation de la Terre) et de la période de l'année (en fonction des variations d'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite du soleil) selon deux axes : l'axe d'azimut et l'axe de hauteur ou d'élévation.

L'azimut du soleil correspond à l'angle horizontal entre la direction du Nord et le soleil. La position du soleil pendant la journée et son angle par rapport au Nord (azimut) augmente de 15° toutes les heures. Quand le soleil est en plein Est, il a un azimut de 90° , plein Sud il sera de 180° , et plein Ouest de 270° .



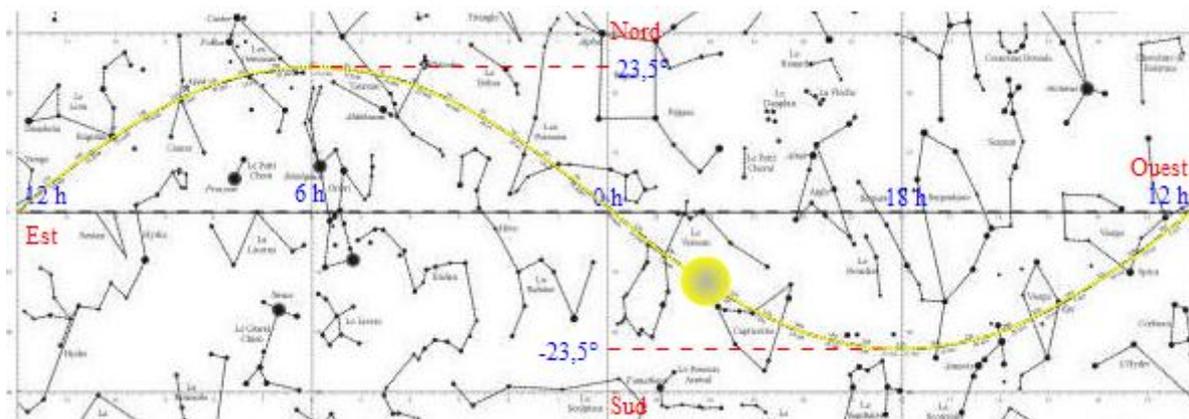
L'élévation du soleil correspond à l'angle vertical du soleil par rapport à l'horizon. L'élévation du soleil à midi varie en fonction des saisons. Elle est à son minimum au solstice d'hiver (21 décembre) et à son plus haut au solstice d'été (21 juin).

L'élévation solaire au solstice d'hiver est égale à $(90^\circ - \text{l'angle de la latitude} - 23^\circ)$ L'élévation solaire au solstice d'été est égale à $(90^\circ - \text{l'angle de la latitude} + 23^\circ)$

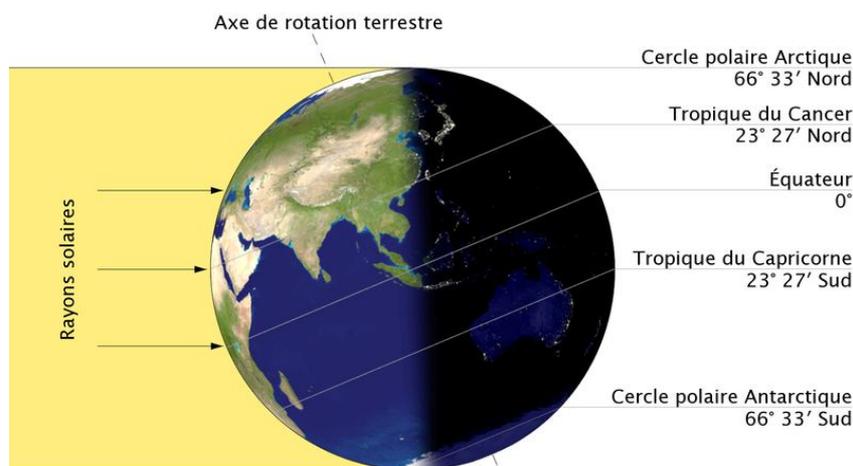
Qu'est ce que le solstice ? L'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport à la verticale du plan de son orbite d'environ $23^\circ 26'$ et son orientation reste constante au cours d'une révolution autour du Soleil. En conséquence, pendant une moitié de l'année, l'hémisphère nord est plus incliné vers le Soleil que l'hémisphère sud, avec un maximum vers le 21 juin. Pendant l'autre moitié l'hémisphère sud est plus incliné que l'hémisphère nord, avec un maximum vers le 22 décembre. Les moments où ces inclinaisons sont maximales sont les solstices.

Au solstice de juin, la déclinaison du Soleil atteint $+23^\circ 26'$; au solstice de décembre, $-23^\circ 26'$. Le reste de l'année, elle évolue entre ces deux extrêmes.

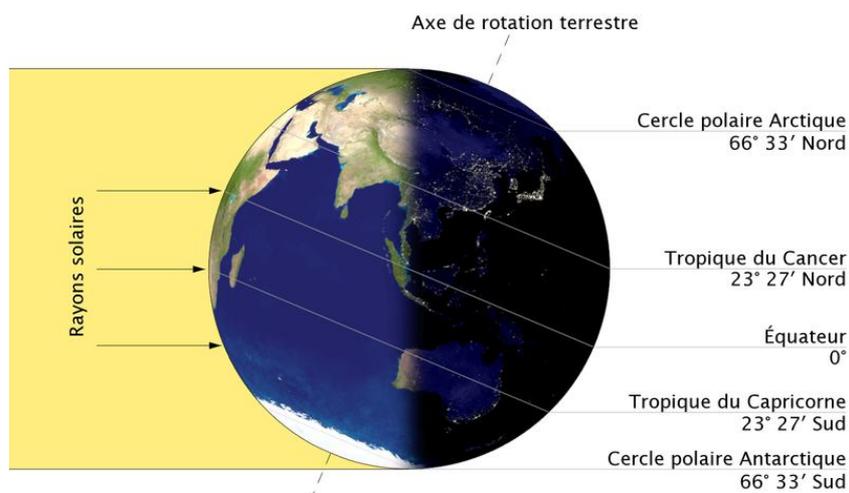
Le terme de solstice ne décrit que les instants où la déclinaison solaire est maximale ou minimale. Par extension, il est possible de parler de solstice pour désigner les jours pendant lesquels la déclinaison est proche de ces valeurs extrêmes.



Cette image montre sur une carte à plat le mouvement du soleil au cours de l'année. Le milieu de la carte à AD=0h correspond à l'équinoxe du printemps. Le solstice d'été est atteint lorsque la déclinaison du soleil est de $23,5^\circ$

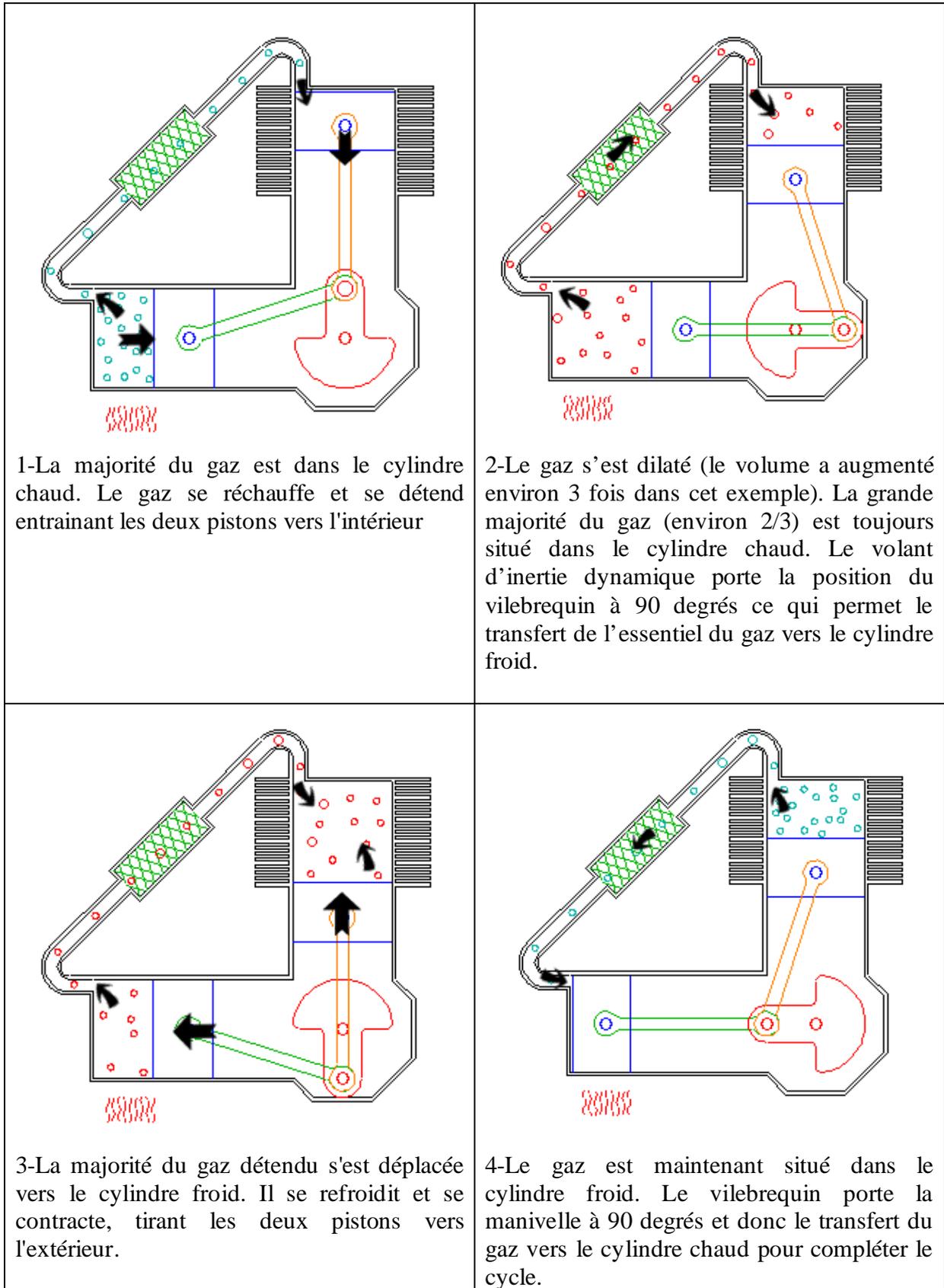


La Terre au solstice d'été

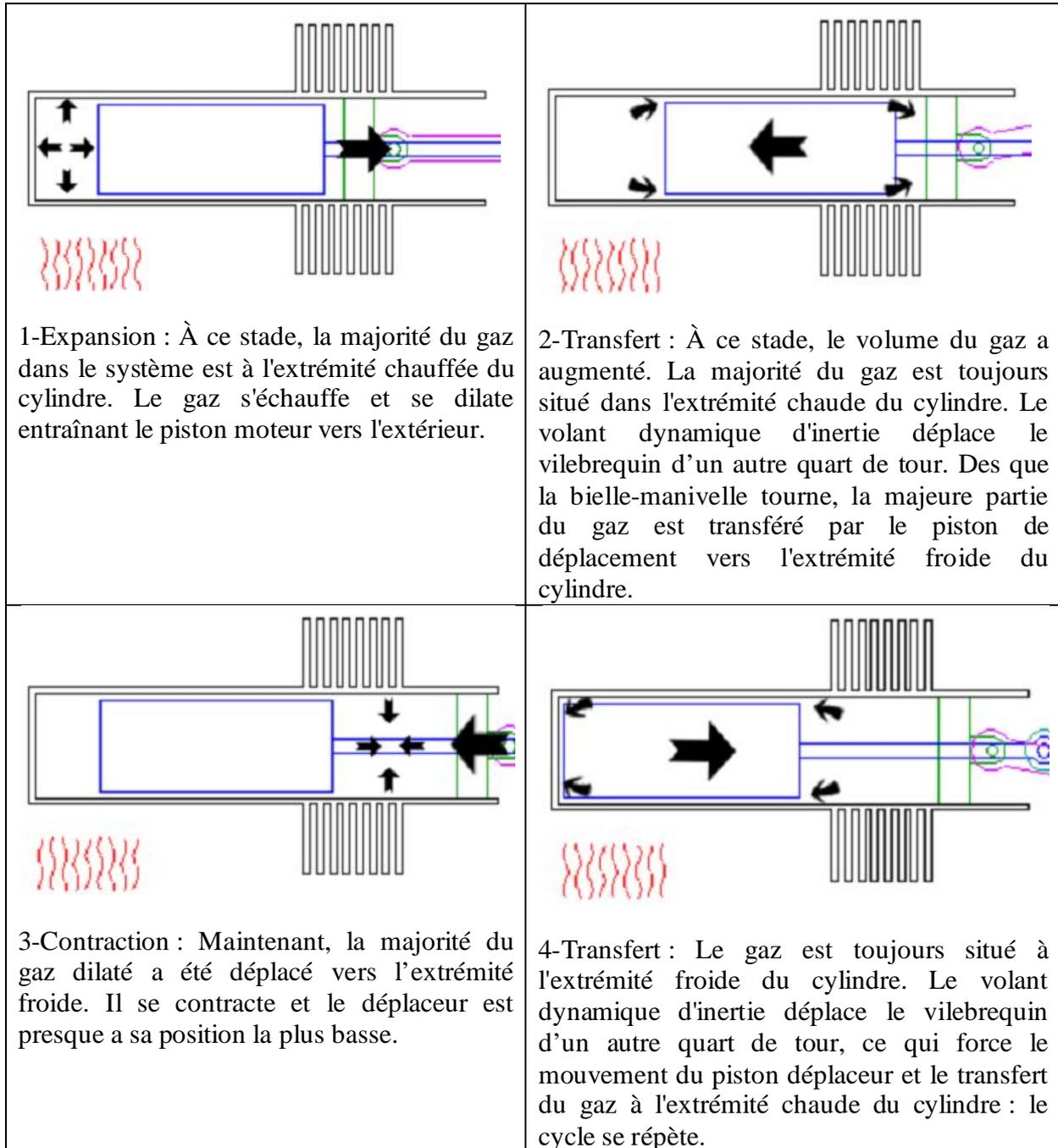


La Terre au solstice d'hiver

A2 : Cycle Stirling sur le moteur Alpha



A3 : Cycle Stirling dans le moteur Beta :



A4 : Quelques applications du moteur Stirling :

A l'heure actuelle, le moteur Stirling n'est pas très connu et répandu. Cependant, le spectre des moteurs Stirling va du micromoteur de laboratoire, se contentant de 1° C de différence de température, au moteur de puissance. On peut donc citer, de façon non exhaustive, les domaines d'application suivants :

La recherche et le monde universitaire :



Le moteur Stirling fait l'objet d'études théoriques et de travaux pratiques afin de mieux connaître son fonctionnement, d'améliorer son rendement et augmenter sa compétitivité vis-à-vis d'autres sources d'énergie. Ces travaux permettront de "modéliser" le fonctionnement du moteur, c'est à dire mettre en équations les échanges de chaleur, les écoulements des fluides, simuler certaines configurations en construisant de petits prototypes.

Moteur Stirling de type *gamma* fonctionnant grâce à la différence de température entre l'air ambiant et la paume de la main

Les usages militaires :

- Un sous-marin d'attaque suédois est équipé de moteurs Stirling pour sa production d'électricité auxiliaire afin d'assurer les fonctions vitales du bâtiment en cas d'indisponibilité de la source principale. Son silence de fonctionnement est un atout majeur dans cette application. Dans le même cadre, la marine australienne l'a aussi adopté pour un sous-marin de 3 000 tonnes de déplacement.

- Des bâtiments de surface militaires utilisent également cette technologie à bord de corvettes ou de bateaux de détection de mines ou de surveillance acoustique.

Le domaine spatial :

Certains satellites se procurent de l'énergie grâce à un moteur Stirling. Le rendement est particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles. La source chaude est constituée par des radio-isotopes. L'utilisation de corps radioactifs n'est pas très écologique et présente des risques au moment de l'envol de la fusée. Sa justification vient du fait que des panneaux solaires peuvent se salir ou être détruits dans certaines zones de l'espace, comme à proximité de Mars.

La recherche et l'exploitation océanographique :

Le SAGA (sous-marin d'assistance à grande autonomie) opérationnel au cours des années 1990, permettait de faire plus de 150 milles nautiques de distance, de mener une campagne de 10 jours de travail par 300 m de fond. Il déplaçait plus de 500 tonnes en plongée et était mu par deux moteurs Stirling alimentés en fuel et oxygène liquide.

Le monde industriel avec la cryogénie :

La réversibilité du moteur Stirling est utilisée afin de produire du froid de façon industrielle. Son rendement est alors excellent. Dans ce type de fonctionnement, on fournit de l'énergie mécanique au moteur. Le résultat est qu'on "pompe" de la chaleur à la source froide pour la restituer à la source chaude, comme un réfrigérateur domestique. Ce mode de fonctionnement est si efficace qu'on utilise ce type d'installation pour liquéfier des gaz.

Les utilisations domestiques :

De petites installations ont été développées aux États Unis afin de fonctionner en cogénération : fourniture d'électricité et chauffage d'habitations. On utilise le combustible de son choix (fuel, bois, granulés de bois...) pour faire sa propre électricité et chauffer sa maison. Si on est relié au réseau électrique, on peut vendre son courant quand on en produit trop (l'hiver), ou en acheter quand on n'en produit pas suffisamment (l'été). Certains bateaux de plaisance sont équipés de la sorte.

La motorisation automobile :

Cette utilisation fait partie du passé (mais peut-être aussi de l'avenir). En effet, la société Philips a étudié au cours des années 1940 à 1980 diverses applications du moteur Stirling. Une de celle-ci consistait à équiper une Ford Torino, mais cet essai ne fut pas transformé et le projet abandonné.

Les loisirs :

Quelques passionnés ont réalisé des modèles réduits qui ont une propulsion réalisée par un moteur Stirling miniature.

Les groupes électrogènes :



Après la seconde guerre mondiale, Philips a mis au point et commercialisé le groupe électrogène dont on voit la photo ci-contre. Ce groupe avait une puissance de 150 watts environ.

A5 : Quelques systèmes Dish-Stirling réalisés :

1. Advanco/Vanguard (1984)



Diamètre du concentrateur : 10.5 m
Surface de projection du miroir : 86.7 m²
336 verre / argent miroirs facettes
Puissance: 25 kW
Efficacité Maximale du système: 30%

2. McDonnell Douglas (1984)



Diamètre du concentrateur : 10.5 m
Surface de projection du miroir : 87.7 m²
82 facettes de miroirs en verre courbés
Puissance : 25 kW
Efficacité Maximale du système : 30%

3. SBP, Riad (1986)



Diamètre du concentrateur : 17 m
Zone d'ouverture du concentrateur : 227m²
Miroirs verre/argent
Suivi azimut-élévation
Puissance : 50 kW
Efficacité Maximale du système : 23%

4. SAIC / STM (1991)



Diamètre du concentrateur : 10,4 m
Zone d'ouverture du concentrateur 84,8 m²
16 facettes de membranes en acier inoxydable avec film réfléchissant en polymère argenté
Suivi azimut-élévation
Puissance : 22 kW
Efficacité Maximale du système : 20%

5. SBP / DISTAL I (1991)



Diamètre du collecteur : 7.5 m
Zone d'ouverture du concentrateur : 42 m²
Membrane en acier avec miroirs de verre recouvertes d'argent
Suivi azimut-élévation
Puissance : 9 kW
Efficacité Maximale du système : 20%

6. Cummins CPG 460 (1992)



Diamètre du concentrateur : 7.3 m
Zone d'ouverture du concentrateur : 41,5 m²
24 facettes de miroirs à membrane tendue à film réfléchissant en polymère argenté
Suivi azimut-élévation
Puissance : 7 kW

7. Big Dish/Australian National University (1994)



Surface du concentrateur : 400 m²
Suivi azimut-élévation
Puissance : env. 50 kW

8. SBP/DISTAL II (1997)



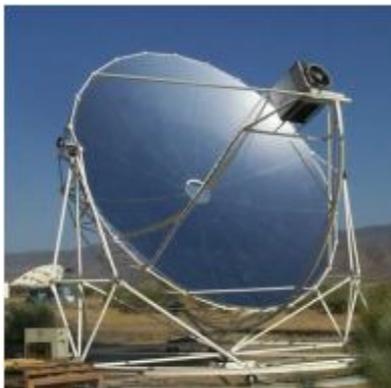
Diamètre du collecteur : 8.5 m
Zone d'ouverture du concentrateur : 53 m²
Membrane de l'acier avec de l'argent m de verre revêtu
Suivi azimut-élévation
Puissance : 10 kW
Efficacité Maximale du système : 21%

9. WGA/Sandia (2000)



_Diamètre du collecteur : 7.5 m
Zone d'ouverture du collecteur : 41 m²
Miroirs de verre recouverts d'argent
Suivi azimut-élévation
Puissance : 10 kW
Efficacité Maximale du système : 24%

10. Euro Dish (2001)



Diamètre du concentrateur : 8.5 m
Ensemble de miroirs en verre de fibres renforcée avec un revêtement argenté
Suivi azimut-élévation
Puissance : 10 kW
Efficacité Maximale du système : 24%

11. Infinia Corporation (2007)



Diamètre du concentrateur : 4.6 m
miroirs de verre enduits de fibre de
verre en plastique renforcé avec de
l'argent
Suivi solaire azimut-élévation
Puissance : 3 kW
Moteur Stirling à piston libre
Efficacité Maximale du système : 24%

12. SES-Tessera Solar (2009)

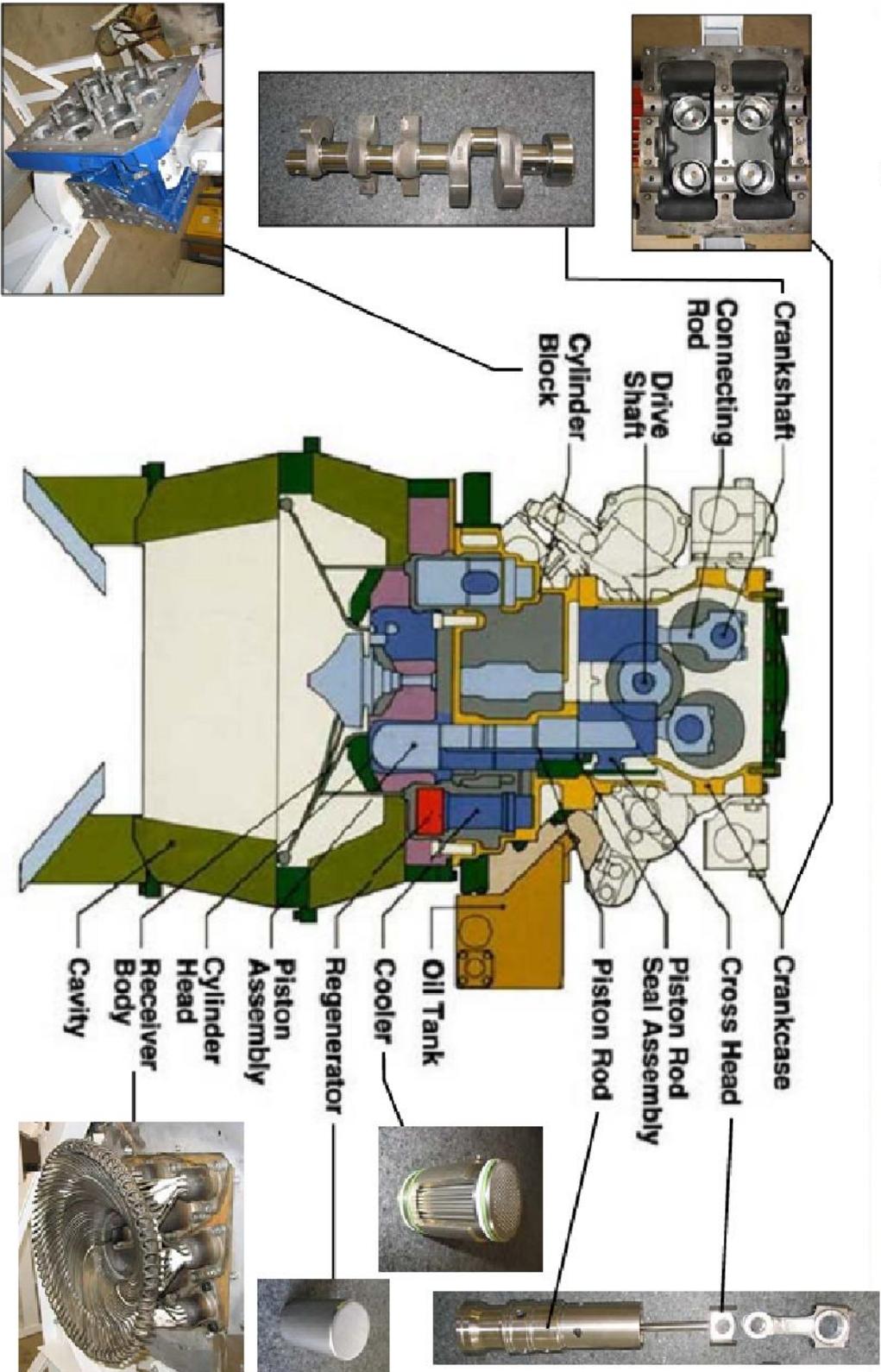


Diamètre du concentrateur : 11.6m
Puissance : 25 kW
Facettes de miroir en verre courbé
Efficacité maximale du système : 31.25%

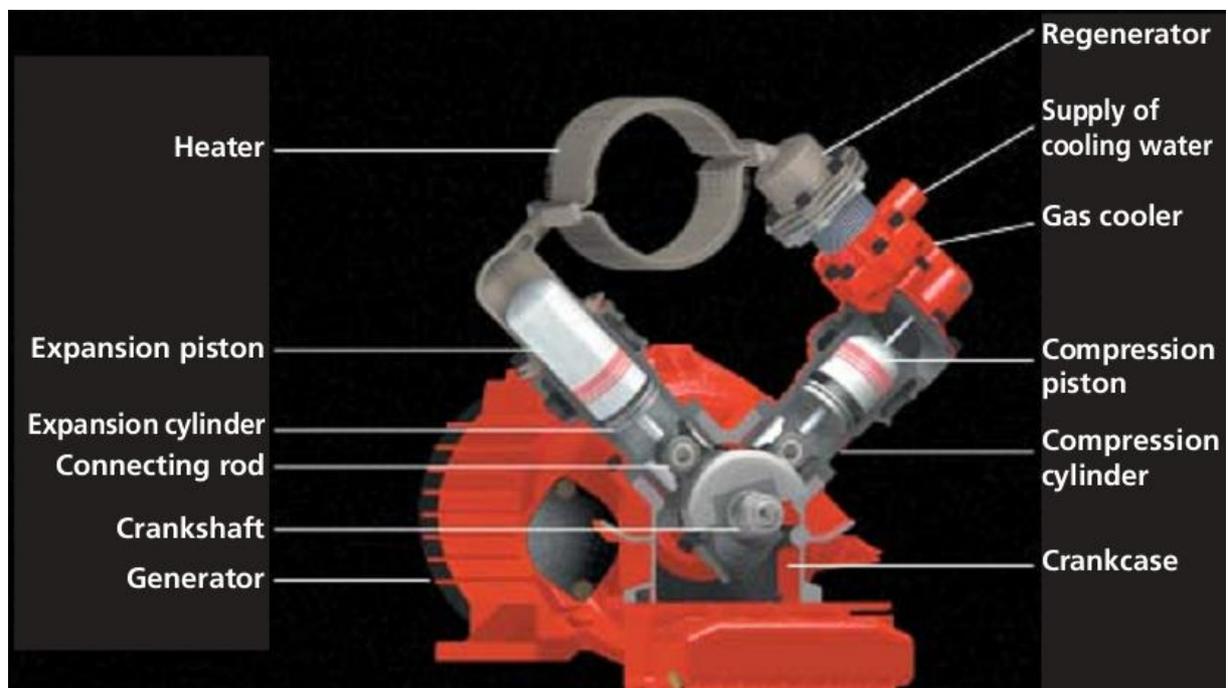
A6 : Schématique du Moteur Stirling cinématique Technologie SES

Stirling Engine Schematic

Stirling Energy Systems, Inc.



A7 : Moteur Stirling : Technologie Euro-Dish



A8 : Tables de données de simulation

Surface totale du miroir	Surface de projection du miroir	Énergie annuelle kWh	Facteur de capacité du système	Efficacité du moteur Stirling à 12h	Pertes au niveau du moteur	Pertes au niveau du récepteur
91	87.7	48098	22	32.8	68.24	14.77
91	89	48913	22.3	32.8	68.27	14.57
91	91	50124	22.9	32.9	68.33	14.27
100	96.3	53032	24.2	32.9	68.67	13.52
100	99	54242	24.8	32.8	68.98	13.18
120	110	56161	25.6	31.3	71.55	11.93
130	120	51282	23.4	26.46	76.38	11
160	150	31978	14.6	0	88.48	8.95

Parameterized Input(s)	Annual Energy {Radiator Effectiveness=0.4}	Annual Energy {Radiator Effectiveness=0.7}
Cooler Effectiveness=0.6	46336.7	48667.8
Cooler Effectiveness=0.7	46858.3	49183.3
Cooler Effectiveness=0.8	47255.5	49577.3
Cooler Effectiveness=0.9	47576.1	49897.1

Parameterized Input(s)	Capacity factor {Radiator Effectiveness=0.4}	Capacity factor {Radiator Effectiveness=0.7}
Cooler Effectiveness=0.6	21.1583	22.2228
Cooler Effectiveness=0.7	21.3965	22.4581
Cooler Effectiveness=0.8	21.5779	22.638
Cooler Effectiveness=0.9	21.7242	22.7841