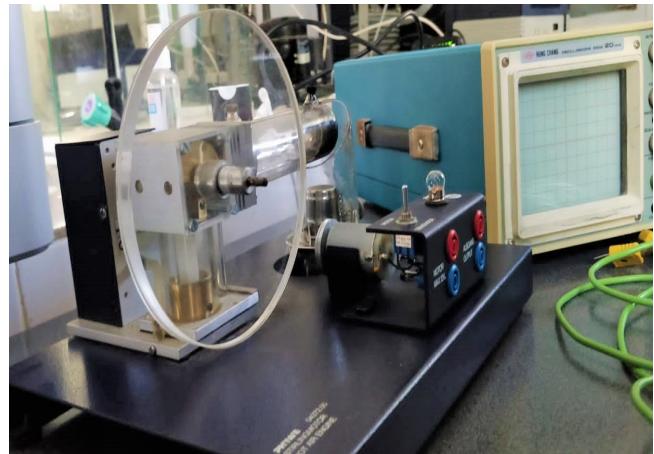
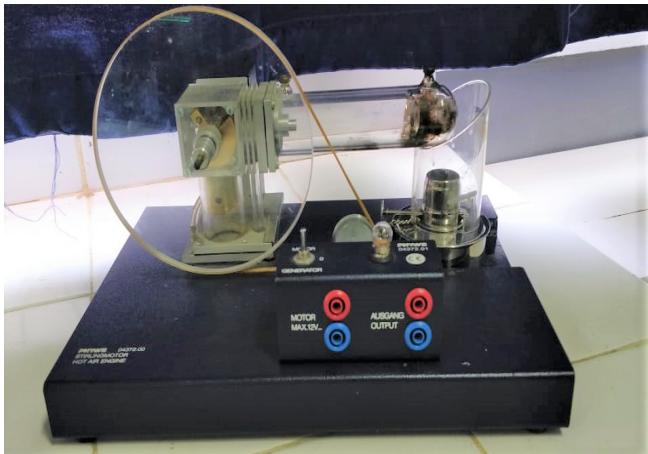


LICENCE ÉNERGIES RENOUVELABLES DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



Rapport du projet de fin d'études¹

Licence sciences et techniques

Élaboration d'un TP sur une machine ditherme : Moteur Stirling

Réalisé par :

CHEFFOUI Hamza
EL FAGHLOUMI Yassine

Encadré par :

Pr. MAHDAOUI Mustapha
Dr. El HAMRI Ahmed

Membres du jury :

Professeur Mohammed AHACHAD	Président
Professeur Mustapha MAHDAOUI	Encadrant
Docteur Ahmed ELHAMRI	Co-Encadrant

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Louange à Allah ! Le Tout Miséricordieux, à Toi que nous venions, à Toi que nous retournerions et c'est Toi dont nous implorons secours. Nos remerciements viennent d'emblée à Toi le Tout puissant d'avoir fait durant notre parcours de volonté, de force et de succès jusqu'aujourd'hui à la réalisation de ce travail si remarquable.

*Au terme de ce travail réalisé au sein de la faculté des sciences et techniques de TANGER, afin de l'obtention du diplôme licence « **Énergies renouvelables** », nous tenons à témoigner notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements à notre Professeur **M. MAHDAOUI** pour son encadrement, ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.*

*Nous aimerais particulièrement à remercier notre Co-encadrant, **Dr. Ahmed El HAMRI**, pour les nombreux conseils et discussions qui ont orienté notre réalisation du TP, aussi pour la qualité de son encadrement et sa constante disponibilité. Nous avons eu le privilège de bénéficier de tous ses précieux conseils tout au long de l'élaboration de ce TP au laboratoire de thermique, de son soutien et ces qualités humaines.*

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à tous nos enseignants et enseignantes qu'avec leur encadrement hautement qualifié dans cette filière, nous avons bénéficié cette formation aussi importante.

À tous nos Professeurs de la faculté des sciences et techniques de TANGER, qu'ils trouvent dans ce travail notre haute considération et nos sincères reconnaissances.

Enfin, nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur soutien et leur encouragement durant toute
la période de mes études,

Ma chère sœur,

Mes frères,

Ma grande famille,

A tous les étudiants de la filière “Énergies renouvelables”,
Ainsi qu’à tous mes amis et collègues sans exception.

Hamza

A mes parents,

Mes frères,

Ma chère sœur,

Mes amies,

Et mes camarades de promotion.

Yassine

Table des matières

Table des figures	4
Liste des tableaux	4
Introduction générale	5
1 Contexte générale du projet	7
1.1 État du secteur énergétique au Maroc	7
1.2 La stratégie énergétique du Maroc	7
1.3 La situation de l'énergie solaire au Maroc	8
1.4 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire	10
1.4.1 Solaire photovoltaïque	10
1.4.2 Solaire thermique	10
1.4.3 Solaire thermodynamique	11
1.4.3.1 Centrales solaires à tour	12
1.4.3.2 Collecteurs à miroirs de Fresnel	12
1.4.3.3 Collecteurs cylindro-paraboliques	13
1.4.3.4 Collecteurs paraboliques	14
2 Moteur Stirling	15
2.1 Généralités et contexte historique	15
2.1.1 Qu'est-ce qu'un moteur Stirling ?	15
2.1.2 Histoire de moteur Stirling	16
2.2 Principe de fonctionnement	18
2.3 Types et catégories	19
2.3.1 Classification des moteurs Stirling selon leur fonctionnement	19
2.3.2 Classification selon leur configuration géométrique	19
2.3.2.1 La configuration Alpha	19
2.3.2.2 La configuration Bêta	20
2.3.2.3 La configuration Gamma	20
2.4 Domaines d'application	21
2.4.1 Production d'électricité	21
2.4.2 Domaine spatial	22
2.4.3 Domaine militaire	22
2.4.4 Domaine de l'informatique	22
2.4.5 Domaine de cogénération	23
2.4.6 Domaine de transport	23

TABLE DES MATIÈRES

2.4.7	Domaine industriel	24
2.5	Principaux composants	24
2.5.1	Source de chaleur	24
2.5.2	Réchauffeur / échangeur de chaleur côté chaud	25
2.5.3	Cylindre et piston de puissance	25
2.5.4	Piston plongeur	25
2.5.5	Volant d'inertie	25
2.5.6	Régénérateur	25
2.5.7	Refroidisseur / échangeur de chaleur côté froid	25
2.6	Le système parabole/Stirling	26
2.6.1	Description générale du système	26
2.6.2	Étude théorique du système parabole/Stirling	27
2.6.2.1	Les propriétés optique et géométrique de parabole	27
2.6.2.2	Bilan thermique du récepteur	30
2.6.2.3	Cycle de Stirling	32
2.6.2.4	Calcul du rendement théorique du moteur Stirling	33
3	Élaboration d'un TP sur le moteur Stirling	36
3.1	La fiche TP	36
3.2	Manipulations	42
3.2.1	Manip. 1 : Étude du dispositif de Stirling en mode récepteur	42
3.2.2	Manip. 2 : Étude du dispositif de Stirling en mode moteur	42
3.2.3	Manip. 3 : Étude du dispositif de Stirling couplé à un concentrateur parabolique	43
3.3	Résultats	44
3.4	Discussions	49
	Conclusion générale	50
	Bibliographie	51

Table des figures

1	Production d'électricité mondiale par source entre 2000 et 2021	5
1.1	Carte de l'irradiation solaire globale au niveau mondial	8
1.2	Carte d'irradiation solaire au Maroc	9
1.3	Bilan des projets solaires au Maroc	9
1.4	Principe du photovoltaïque(à gauche)/Parc photovoltaïque(à droite)	10
1.5	Les différents technologies de la concentration solaire [6]	11
1.6	Centrale solaire à tour, Ouarzazate, Maroc	12
1.7	Collecteur à miroirs de Fresnel	13
1.8	Centrale solaire à capteur cylindro-parabolique, à Béni Mathar, au Maroc	13
1.9	Centrale solaire à capteur parabolique, White Cliffs, Australie .	14
2.1	Moteur Stirling	15
2.2	Robert Stirling	16
2.3	Schéma extrait du brevet déposé par Robert Stirling	16
2.4	Moteur Stirling de type LTD	18
2.5	Moteur Stirling de configuration Alpha	19
2.6	Moteur Stirling de configuration Bêta	20
2.7	Moteur Stirling de configuration Gamma	20
2.8	Centrale de Maricopa, Arizona, Etats-Unis	21
2.9	Microprocesseur refroidi par moteur Stirling	23
2.10	Chaudière à bois Stirling	23
2.11	Opel Kadett Stir-Lec-i, 1969	24
2.12	Description du système Dish-Stirling	26
2.13	Propriétés géométriques de la parabole	27
2.14	Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même d'ouverture d	28
2.15	Paraboloïde de révolution	28
2.16	Elément différentiel de surface parabolique	29
2.17	Comparaison entre le miroir sphérique (à gauche) et le miroir (à droite)	29
2.18	Représentation des pertes dans un récepteur Parabole-Stirling . .	31
2.19	Diagramme Clapeyron du cycle Stirling théorique	32
2.20	Cycle Stirling réel	35
3.1	Montage expérimental : Moteur Stirling	38
3.2	Étalonnage du capteur de pression	39

3.3	Réglages pour l'étalonnage de la pression	40
3.4	Modification du canal	40
3.5	Paramètres de mesure	41
3.6	Moteur Stirling avec les accessoires solaires	43
3.7	$p(t)$ et $V(t)$ du cycle récepteur	44
3.8	Cycle Stirling réel en mode récepteur	45
3.9	$p(t)$ et $V(t)$ du cycle moteur	46
3.10	Cycle Stirling réel en mode moteur	46
3.11	Les graphes de W_m, W_{pV}, W_{fr} et P_m tracés par Excel	47
3.12	P_e et P_m en fonction de n tracés par Excel	48
3.13	Cycle Stirling réel visualisé par l'interface de l'oscilloscope	49

Liste des tableaux

3.1	Les outils utilisés dans la manipulation	38
3.2	Les valeurs des W_m, P_m, W_{pV}, W_{fr} suivant le couple	47
3.3	Le point de la puissance maximale	47
3.4	Les valeurs de la puissance électrique P_e délivrée dans la lampe	48
3.5	Les puissances maximales pour calculer le rendement électrique	48

Introduction générale

DÉ nos jours, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, due en grande partie à l'utilisation de combustibles fossiles, et l'épuisement de ces derniers ont été bien documentés au cours de ces dernières décennies, et de nombreuses études indiquent la nécessité d'innover en matière de production des énergies renouvelables. En effet, la hausse demande énergétique et surtout en matière de l'électricité, qui devrait se poursuivre pourachever un développement durable, représente un énorme risque pour l'environnement, et la façon dont nous choisissons de produire cette électricité sera un facteur clé dans la détermination de la future de l'humanité.

Le monde continue sa démarche vers la transition énergétique. À la fin de 2021, les énergies renouvelables représentaient 38% (en comptant la filière nucléaire) de la capacité mondiale installée, selon l'IRENA (The International Renewable Energy Agency)[\[1\]](#) et l'organisation EMBER[\[2\]](#).

Le monde a ajouté près de 257 gigawatts (GW) d'énergies renouvelables, augmentant ainsi le stock d'énergie renouvelable de 9,1% et contribuant à un pourcentage sans précédent de 81% des ajouts d'énergie mondiale. L'énergie solaire a représenté à elle seule plus de la moitié des ajouts d'énergies renouvelables, avec un record de 133 GW, suivie par 93 GW d'énergie éolienne, la capacité d'énergie éolienne en mer atteignant un record de 21 GW.

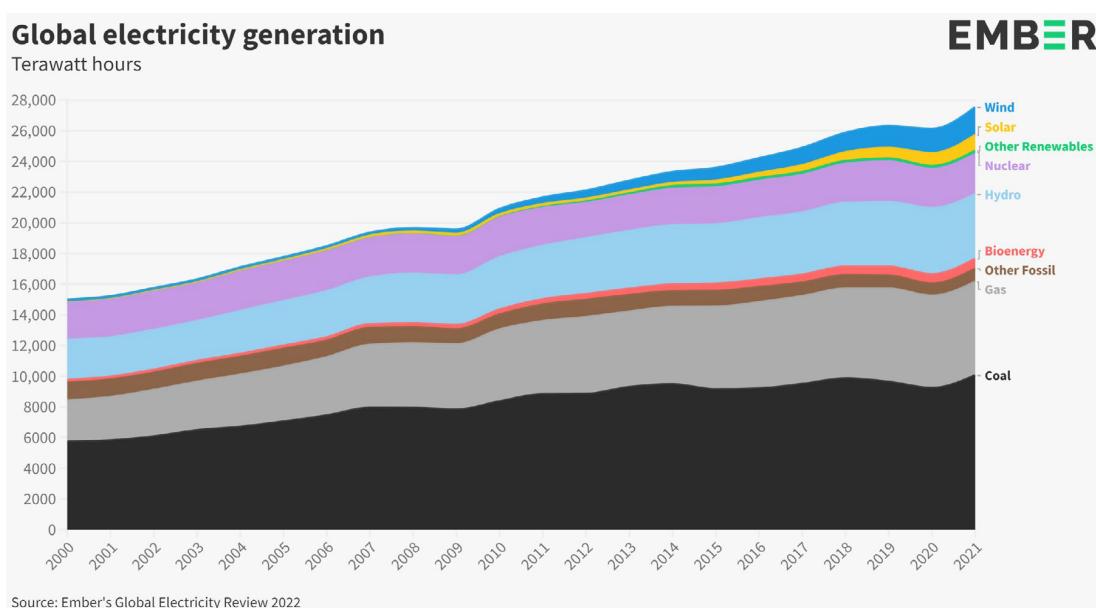


Figure 1 – Production d'électricité mondiale par source entre 2000 et 2021

Avec cette croissance de la capacité installée de solaire et d'éolien, le secteur de l'électricité reste le point le plus brillant pour les énergies renouvelables. Cependant, le taux de croissance n'est toujours pas suffisant pour garantir un avenir juste, inclusif et durable pour tous, on voit que 62% de l'électricité produite provient de sources fossiles. Ainsi, le choix des énergies renouvelables devrait être la norme pour les nouveaux ajouts d'énergie pour rester sur la voie de l'objectif climatique de 1.5 °C.

Dans ce contexte énergétique et écologique, nous assistons à la recherche de technologies de production d'énergie propre. Ainsi, de nouvelles perspectives comme la conversion thermodynamique de l'énergie solaire est offerte pour valoriser cette ressource durable. Dans ce cadre, nous nous intéressons aux moteurs thermiques à apport de chaleur externe : le moteur Stirling, une machine thermique fonctionnant suivant le cycle de Stirling, constitue une alternative pour profiter des radiations solaires, puisque ces machines sont des machines à combustion externe.

Pour cela, notre travail est structuré en trois chapitres comme suit :

- ◊ Dans le premier chapitre, on va commencer par la présentation du contexte générale de ce projet, en mettant l'accent sur les stratégies adoptées à l'échelle nationale en termes d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique, et les buts qui vise le Maroc àachever dans cette filière, ensuite nous présenterons les différentes technologies et variantes de l'énergie solaire.
- ◊ Le second chapitre porte sur le moteur Stirling, histoire, principe de fonctionnement, types et domaines d'utilisation, plus une description détaillée de l'aspect thermo- physique qui régit ce moteur et le système Parabole-Stirling.
- ◊ On va consacrer le dernier chapitre à l'élaboration d'une fiche TP sur le fonctionnement de Moteur Stirling au profit des étudiants de la FST Tanger, en outre, nous présenterons notre réalisation, notre expérience et nos mesures.
- ◊ Enfin, une conclusion générale où on va évoquer les principaux résultats trouvés au cours de ce travail sur les plans théorique et pratique, et les perspectives possibles.

Contexte générale du projet

1.1 État du secteur énergétique au Maroc

En terme du secteur énergétique, le Maroc n'a jamais connu qu'une situation de dépendance pour satisfaire sa demande croissante immanente à son essor économique et à sa progression démographique. D'une part vis-à-vis les importations des combustibles fossiles de l'extérieur, qui représentent 90% de l'approvisionnement total en énergie primaire et 80% de l'approvisionnement en électricité, d'autre part, vis-à-vis du secteur privé, qui contrôle aujourd'hui la majorité de la production d'électricité et la quasi-totalité de la distribution de l'énergie (Engie, ACWA, Gamesa, Siemens, Taqa, Green of Africa...).

Pour cela le Maroc affiche de grandes ambitions dans le domaine de la production d'énergie propre. Sans gisements de pétrole et de gaz, développer les énergies renouvelables semble une décision stratégique judicieux pour minimiser la dépendance énergétique. Lors de la COP22 en novembre 2016 à Marrakech, Il s'est fixé pour objectif de porter à 52% la part des énergies renouvelables dans la capacité de production d'électricité d'ici à 2030.

Aujourd'hui, 37% de la production d'électricité est « verte », dont 1770 MW provient de l'hydroélectricité, suivi par l'éolienne avec une capacité de 1430 MW, puis l'énergie solaire avec 750 MW[3]. Le Maroc est un leader dans le développement de technologies énergétiques propres, il a également été l'un des premiers pays du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord à réduire les subventions aux combustibles fossiles.

1.2 La stratégie énergétique du Maroc

Depuis une décennie, le Maroc a adopté une stratégie énergétique nationale dotée d'une vision sur le moyen et le long terme, cette stratégie a pour but de sécuriser l'approvisionnement de l'énergie, et avoir un accès généralisé à une énergie à faible coût tout en préservant l'environnement. La stratégie énergétique nationale qui a été lancée en mars 2009 par le Royaume, s'articule autour deux axes, d'une part le développement du potentiel national en ressources énergétiques renouvelables (solaires, éolienne, hydroélectrique), et d'autre part la promotion de l'efficacité énergétique dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et de transport.

Pour réussir sa stratégie, le Maroc a instauré un cadre législatif et règlementaire permettant d'accélérer la réalisation des projets, on peut citer :

- **La loi 13-09** relative aux énergies renouvelables qui encourage la production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables pour un consommateur ou un regroupement de consommateurs raccordés au réseau électrique national moyen tension, haute tension, très haute tension.
- **La loi 47-09** relative à l'efficacité énergétique porte sur l'intégration durable des techniques d'efficacité énergétique dans les programmes de développement sectoriels, l'audit énergétique, et le règlement thermique de construction au Maroc (RTCM).
- **La loi 58-15** complétant la loi 13-09 relative aux énergies renouvelables.
- **La loi 48-15** relative à la création de l'Autorité Nationale de Régulation de l'Electricité pour le renforcement du secteur électrique national.

En parallèle, il a créé plusieurs institutions l'Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE) qui est maintenant connu sous le nom de l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE), l'Agence Marocaine de l'Énergie Solaire qui s'est transformée en 2016 à l'Agence Marocaine pour l'Energie durable (MASEN), la Société d'Investissement Energétique (SIE), et dernièrement l'IRESEN (Institut de Recherche en Énergie Solaire et Energies Nouvelles)[4].

1.3 La situation de l'énergie solaire au Maroc

L'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie renouvelable disponible en grande quantité, en tout point de la surface terrestre et gratuite. C'est à l'origine du vent, des cycles de l'eau, et de la photosynthèse sur laquelle est fondée toutes les chaînes alimentaires, du règne végétal au règne animal, y compris les humains. Chaque année, la terre reçoit 1 070 000 pétawatts-heures, soit 8 000 fois la consommation mondiale d'énergie. Cela signifie que nous exploitons seulement 0,01% de cette énergie. Alors si on faisait appel à des procédés et des techniques sophistiqués, nous pourrions couvrir l'ensemble des besoins énergétiques de la planète.

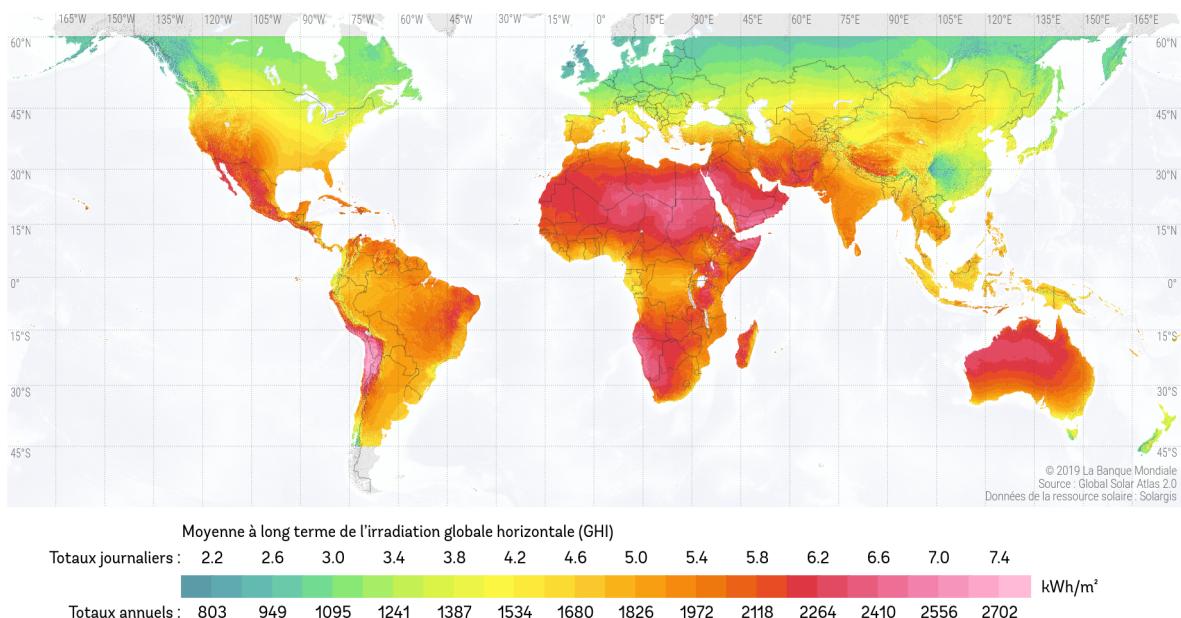
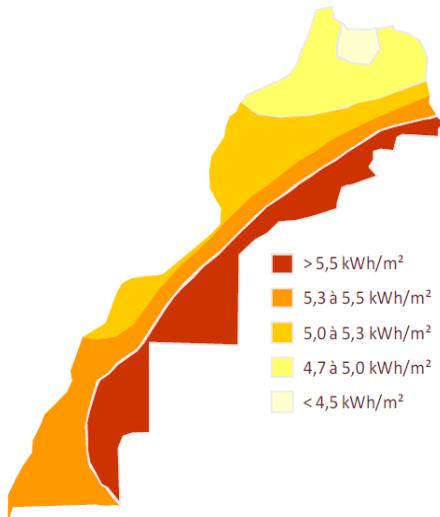


Figure 1.1 – Carte de l'irradiation solaire globale au niveau mondial

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRALE DU PROJET

Les zones situées sous des latitudes proches de l'équateur sont les plus favorables à l'énergie solaire. Le Maroc, en raison de sa situation géographique et son appartenance à ces zones climatiques bénéficient de cette ressource renouvelable, grâce à différents procédés, dont les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermodynamiques. Selon MASEN, le Maroc dispose d'un potentiel solaire illustré par 2 800 et 3 400 heures d'ensoleillement par an, soit une irradiation moyenne de 6,5 kWh/m²/jour[5].



Source : MASEN

Figure 1.2 – Carte d'irradiation solaire au Maroc

Et à cet égard, le Plan Solaire marocain (PMS), un programme national de l'énergie solaire qui s'inscrit dans le cadre de la stratégie énergétique nationale, a été lancé le 2 novembre 2009 d'un coût d'investissement estimé à 70 milliards de DH. Ce programme vise la montée de la production électrique à 2 000 MW à partir de la filière énergétique solaire, à l'horizon 2020. A cet effet, de nombreuses installations photovoltaïques et thermodynamiques ont été réalisées et d'autres vont être réalisées et pilotées par la MASEN (Moroccan Agency for Sustainable Energy).

Projets mis en exploitation	Projets en cours	Projets dans le portefeuille
Noor Ouarzazate (580 MW)	Noor Midelt II : 230 MW (en phase de préqualification)	Noor PV II : 800 MW sur plusieurs provinces (Laâyoune, Boujdour, Taroudant, Kelâat Sraghna, Khouribga, Lhajeb, Guercif, Sidi Bennour et Jerada).
Noor Laâyoune I (80 MW)	Noor Missour (centrale photovoltaïque ONEE) : 40 MW	
Noor Boujdour I (20 MW)	Noor Erfoud (PV ONEE) : 40 MW	Autres projets PV : 200 MW à Tantan, Tata, Outat El Haj, Ain Beni Mathar, Boudnib, Bouanane, Enjil.
Ain Beni Mathar (20 MW)	Noor Zagora (PV ONEE) : 40 MW	

Source : Masen - Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Environnement

Figure 1.3 – Bilan des projets solaires au Maroc

1.4 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire

Technologiquement, deux voies de conversion de l'énergie solaire sont en compétition, il s'agit du :

1.4.1 Solaire photovoltaïque

Cette technologie transforme directement le rayonnement solaire en électricité par l'effet photovoltaïque, cet effet a été découvert par le physicien français « Edmond Becquerel » en 1839 et expliqué par « Albert Einstein » en 1905.

Son principe peut être illustré par une simple diode qui fonctionne en inverse où le champ électrique déplace les électrons de la jonction p vers la jonction n. L'effet photovoltaïque permet la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, ces électrons seront la base du courant qui traverse les cellules du panneau photovoltaïque, dont le rôle des rayons lumineux c'est l'augmentation du nombre des électrons disponibles à la conduction électrique. Ces électrons proviennent des atomes du dopage (Phosphore, Bore), l'utilisation des semi-conducteurs est nécessaire pour la fabrication des panneaux photovoltaïques en raison de leurs conductivité moyenne.

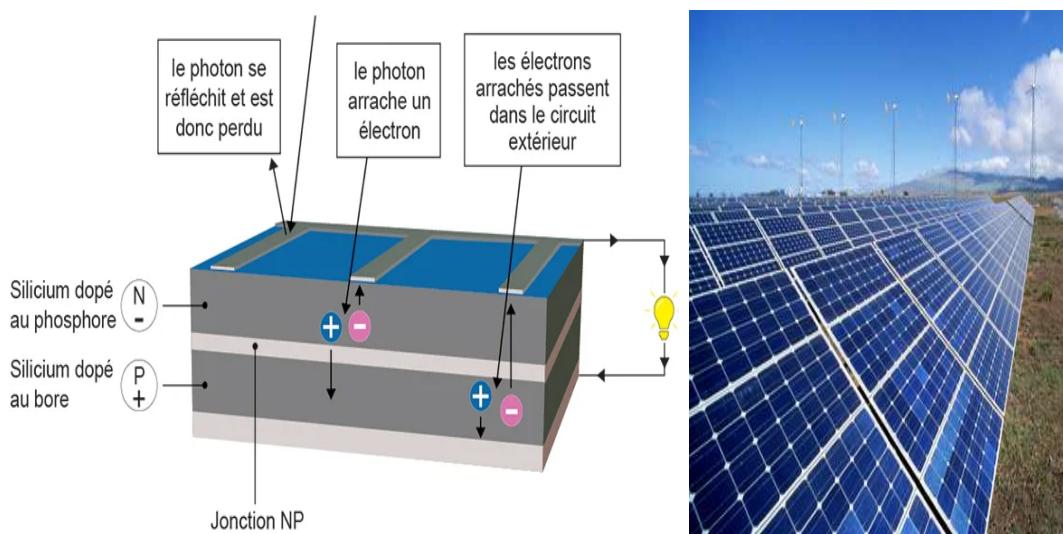


Figure 1.4 – Principe du photovoltaïque (à gauche)/Parc photovoltaïque (à droite)

1.4.2 Solaire thermique

Cette technologie transforme le rayonnement en chaleur, pour l'utiliser dans le séchage, le chauffage, le dessalement de l'eau de mer ou bien la production de l'eau chaude sanitaire.

Le solaire dit « Thermodynamique » est une des variantes du solaire thermique, il permet aussi de produire l'électricité par voie thermodynamique en transformant l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée puis grâce aux propriétés des fluides en énergie mécanique et dans un second temps en électricité comme dans les centrales thermiques classiques.

1.4.3 Solaire thermodynamique

L'énergie solaire a un potentiel important, mais elle est très peu dense. Il faut donc la concentrer pour en tirer le meilleur parti. L'objectif est d'obtenir une température suffisamment élevée à la source chaude, et de la transférer soit au fluide de travail (cas d'un moteur Stirling) ou bien à un fluide caloporteur (les autres technologies CSP), afin d'obtenir des rendements élevés. En effet, l'écart de température entre la source chaude et la source froide est le facteur majeur affectant le rendement d'un système thermodynamique.

Pour concentrer les rayons lumineux, on utilise le phénomène de réflexion par les miroirs. C'est la méthode le plus souvent utilisée dans les concentrateurs solaires thermiques. De nombreux méthodes ont été imaginées et essayées, dans le but de déterminer quelle forme aura le meilleur rendement de transmission de l'énergie solaire. Certaines technologies utilisent des réflecteurs mobiles et des récepteurs fixes, tandis que d'autres préfèrent des réflecteurs et des récepteurs mobiles.

Le principe commun des technologies de concentration consiste à chauffer un fluide. Alors, pour avoir des niveaux de température importants, les rayonnements solaires doivent être concentrés. L'énergie thermique produite sera convertie en énergie mécanique par un cycle thermodynamique, puis en énergie électrique grâce à l'alternateur. Le solaire thermodynamique a une capacité de stockage en énergie chimique par le biais de réactions chimiques endothermiques.

Deux grands principes de concentration coexistent dans l'ensemble des modèles étudiés :

- **Les concentrateurs linéaires :** La concentration s'effectue sur des tubes cylindriques de grandes longueurs dans lesquels circule un fluide caloporteur. Les tubes se trouvent sur la ligne focale des réflecteurs, concentrent les rayonnements solaires. Le suivi du soleil nécessite au moins un axe dans ce modèle. Les capteurs cylindro-paraboliques et les capteurs de Fresnel sont basés sur ce principe.
- **Les concentrateurs ponctuels :** La concentration s'effectue sur un récepteur central. Les réflecteurs font le suivi du soleil sur deux axes : en azimut et en élévation. Ce principe est utilisé par les concentrateurs paraboliques et les centrales à tour.

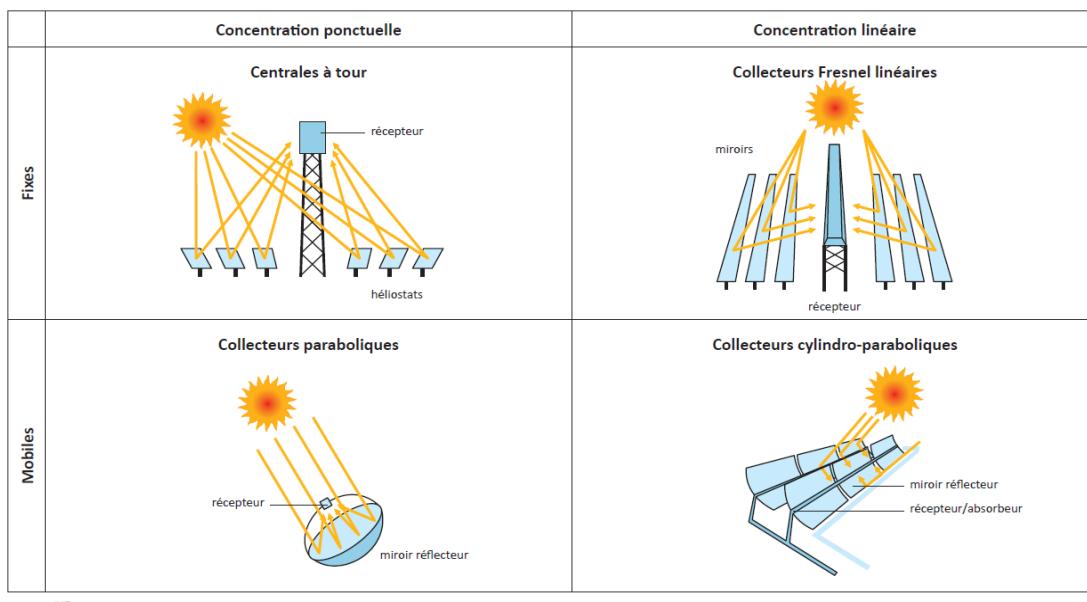


Figure 1.5 – Les différents technologies de la concentration solaire [6]

Il y a quatre grandes familles de technologie de concentration solaire, en conséquence, quatre types des centrales solaires thermiques :

1.4.3.1 Centrales solaires à tour

Un tour solaire est une centrale présentant un dispositif de concentration solaire. Ce dispositif est composé des miroirs plans appelés héliostats et d'une tour comportant un récepteur utilisé pour le transfert thermique situé en haut et pouvant dépasser les 100 mètres. Ce récepteur ou bien chaudière contient un fluide caloporteur (souvent du sel fondu). A l'aide d'héliostats, les rayons solaires seront regroupés au foyer avec une grande précision, chaque héliostat traque le soleil individuellement tout au long du jour et peut effectuer un mouvement de rotation autour de deux axes. Le facteur de concentration est de l'ordre de 600 à plusieurs milliers, d'où la température peut dépasser les 1000 °C.



Figure 1.6 – Centrale solaire à tour, Ouarzazate, Maroc

C'est un système à simple réflexion. Un inconvénient des centrales à tour est qu'elles doivent être grandes, tour haute pour avoir une rentabilité acceptable, elles nécessitent aussi un fort ensoleillement. Un avantage de ces centrales réside au niveau des déperditions d'énergie. Les pertes convectives à l'ambiance sont négligeables car la surface exposée est limitée. En outre, ces centrales sont écologiques, pas d'émissions polluantes.

1.4.3.2 Collecteurs à miroirs de Fresnel

Les collecteurs linéaires de Fresnel sont composés de plusieurs miroirs parfaitement plans, des réflecteurs compacts linéaires, qui renvoient les rayons vers un miroir secondaire, ou directement vers le récepteur suivant les montages. Chaque miroir peut pivoter selon un axe parallèle au tube absorbeur, afin de suivre la course du soleil durant le jour. Le tube récepteur contient un fluide caloporteur qui, en circulant, est chauffé à 500 °C, cette énergie est transférée à des circuits d'eau, produisant ainsi la vapeur pour entraîner des turbines génératrices d'électricité.

Les avantages de cette technologie sont :

- Coût inférieur des miroirs.
- La facilité de la conception et la durabilité.



Figure 1.7 – Collecteur à miroirs de Fresnel

1.4.3.3 Collecteurs cylindro-paraboliques

Les collecteurs cylindro-paraboliques sont constitués de miroirs concaves linéaires dont la forme est celle d'une parabole, qui collectent et concentrent le rayonnement solaire sur un tube récepteur placé le long de sa ligne focale. Le facteur de concentration de telles installations est généralement inférieur ou environ 100.

Le rôle du mécanisme de suivi est d'ajuster l'inclinaison du capteur afin que le rayonnement solaire incident soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchie au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur qui peut monter jusqu'à 500 °C de température, la chaleur est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. L'ensemble du concentrateur cylindro-parabolique est mobile, il est orienté selon un axe nord-sud et suit la course du soleil d'est en ouest.

Les centrales cylindro-paraboliques sont actuellement les plus éprouvées en matière des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, et cela est dû à sa capacité de fonctionner jour et nuit sans intermittence avec un système de stockage de chaleur.



Figure 1.8 – Centrale solaire à capteur cylindro-parabolique, à Béni Mathar, au Maroc

1.4.3.4 Collecteurs paraboliques

Les collecteurs paraboliques sont formés par un ensemble de miroir incurvés dont l'assemblage entraîne la réalisation d'une parabole comme celle de réception satellite, les concentrateurs paraboliques sont en 3 dimensions car ils forment une courbe de la même manière sur toute leur longueur et largeur.

Par principe de réflexion, lorsque la lumière frappe une surface réfléchissante, elle sera réfléchie sous le même angle. Le concentrateur solaire parabolique est conçu avec un miroir incurvé afin que toute la lumière soit réfléchie vers un seul point appelé le foyer où se trouve le récepteur. Le rayonnement solaire est focalisé sur le récepteur auquel la température s'élève. Ces systèmes suivent le soleil sur deux axes, et peuvent atteindre des coefficients de concentration supérieurs à 2000 dans les meilleures conditions, avec une température de 750 °C.

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



Figure 1.9 – Centrale solaire à capteur parabolique, White Cliffs, Australie

Chapitre 2

Moteur Stirling

2.1 Généralités et contexte historique

2.1.1 Qu'est-ce qu'un moteur Stirling ?

Un moteur Stirling est un moteur thermique, son principe de fonctionnement est basé sur la dilatation et la compression cyclique d'un gaz à différentes températures pour transformer la chaleur en énergie mécanique. Comme la machine à vapeur, le moteur Stirling a traditionnellement été classé comme un moteur à combustion externe car tout transfert de chaleur vers et depuis le fluide de travail passe à travers les parois du moteur. Ce principe diffère totalement à celui d'un moteur à combustion interne où l'apport de chaleur se fait par une réaction de combustion à l'intérieur du corps du fluide de travail.

Sa fonction est d'accumuler puis de restituer la chaleur fournie et absorbée au gaz de travail le traversant d'un volume chaud à un volume froid et inversement. Ainsi, une partie de l'énergie transférée est récupérée à chaque cycle.

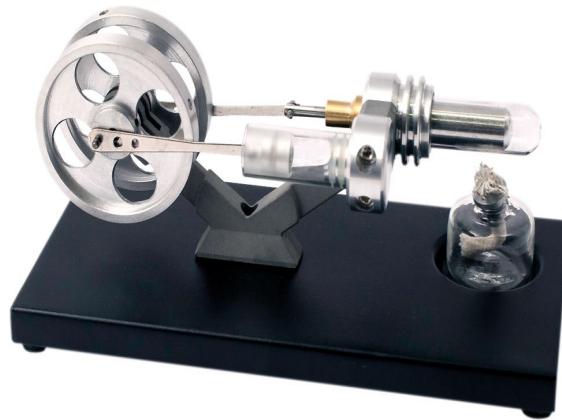


Figure 2.1 – Moteur Stirling

L'efficacité de cette machine est limitée par l'efficacité du cycle de Carnot, qui dépend de la température entre les sources chaud et froid. Un moteur Stirling est spécial en raison de son rendement élevé par rapport à une machine à vapeur, son fonctionnement silencieux et de la possibilité d'utilisation de presque toutes les sources de chaleur pour l'entrainer, soit des carburants ou de l'énergie solaire concentrée.

2.1.2 Histoire de moteur Stirling

Durant le XIXème siècle, les moteurs utilisés étaient des moteurs à vapeur dont les chaudières présentaient des risques d'explosion. Robert Stirling (1790-1878), un mécanicien et métallurgiste écossais a conçu un moteur à combustion externe qui utilise de l'air sous des pressions relativement faibles pouvant remplacer la chaudière soumise à de fortes pressions.

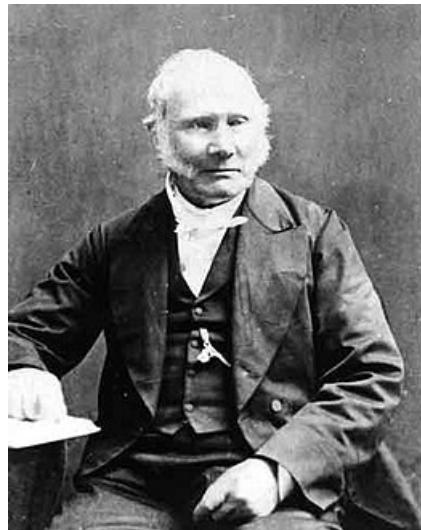


Figure 2.2 – Robert Stirling

Le 27 septembre 1816, « Robert Stirling » a déposé une demande de brevet pour son économiseur à Édimbourg, en Écosse. La machine se présentait sous la forme d'un moteur thermique inversé, et incorporait le déphasage caractéristique entre le plongeur et le piston, le moteur comportait également le chauffage et le refroidissement cycliques du gaz interne au moyen d'une source de chaleur externe, mais le dispositif n'était pas encore connu sous le nom de moteur Stirling. Ce nom a été inventé près de cent ans plus tard par l'ingénieur néerlandais « Rolf Meijer » pour décrire tous les types de moteurs à gaz régénératifs à cycle fermé. Initialement, Stirling considérait son moteur comme une machine à mouvement perpétuel du second type, c'est-à-dire que toute la chaleur fournie serait transférée en travail même si le moteur ne fonctionnait pas[7].

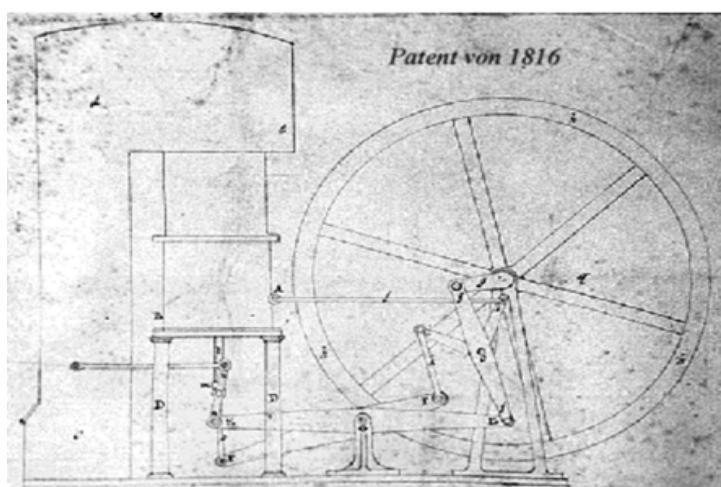


Figure 2.3 – Schéma extrait du brevet déposé par Robert Stirling

En 1843, avec son frère « James Stirling », il réalise son moteur dans une fonderie “Dundee Foundry Company”. Malgré tous ses efforts, ce moteur développait une puissance spécifique trop faible par rapport une machine à vapeur. De plus, le moteur doit être exposé à des températures élevées pour être efficace, or les matériaux disponibles à l'époque se détérioreront rapidement sous l'effet des températures élevées. Étant donné que le moteur Stirling ne peut pas rivaliser avec d'autres moteurs, il ne sera utilisé qu'avec les applications marginales à faible puissance.

En 1850, « William John Macquorn Rankine » étudia les moteurs à air chaud et développa une théorie complète des moteurs Stirling. Mais ce n'est qu'en 1871, 55 ans après l'invention du moteur, que le cycle de Stirling fut expliqué thermodynamiquement par « Gustav Schmidt » de l'Institut Polytechnique de Prague, à la fin du 19ème siècle, les progrès de la thermodynamique sont significatifs.

En 1889, la société américaine « Rider Ericsson Engine Company » lance la première pompe hydraulique à air chaud. Elle l'a produit jusqu'au début des années 1900 et l'a exporté dans le monde entier.

Cependant, ce n'est que dans les années 1930 que le moteur Stirling a été sérieusement étudié à nouveau par les recherches de la compagnie néerlandaise « Philips » et que son application à toutes sortes de technologies a été testée. En 1938, un moteur Stirling (comparable aux moteurs à essence d'aujourd'hui) a été construit avec plus de 200 chevaux et plus de 30% d'efficacité.

En 1953, Philips sort le groupe électrogène de 180/200W appelé MP1002CA, conçu à partir d'un moteur Stirling. Environ 150 de ces appareils ont finalement été produits, certains se sont retrouvés dans les départements d'ingénierie des universités et des collèges du monde entier donnant à des générations d'étudiants une introduction précieuse sur le moteur Stirling. Parallèlement à MP1002CA, Philips a développé des moteurs Stirling expérimentaux pour une grande variété d'applications et a continué à travailler dans ce domaine jusqu'à la fin des années 1970, mais n'a obtenu un succès commercial qu'avec ses applications en cryogénie ,“la production du froid”.

Cependant, la prépondérance du moteur à diesel et le moteur à essence ont éclipsé les atouts du moteur Stirling, et il a fallu les dernières décennies pour qu'il paraisse à nouveau. En effet, la prise de conscience en matière d'énergie, de la pollution et du développement durable a récemment conduit des groupes de recherche et des industriels à s'engager sur la voie du moteur à air chaud. La source de chaleur utilisée par le moteur Stirling peut être de plusieurs types : énergie nucléaire, solaire, biomasse ou fossile, ce qui en fait une machine “propre” polyvalente et potentiellement puissante. Le moyen chauffage qui nous intéresse ici est l'énergie solaire à concentration avec des miroirs paraboliques.

2.2 Principe de fonctionnement

Dans sa configuration la plus simple, le moteur Stirling est constitué d'un cylindre contenant un volume fixe de gaz appelé "fluide de travail", l'air, l'hydrogène ou l'hélium sont les gaz les plus souvent utilisés, le moteur est étanche de telle sorte qu'aucun gaz n'entre ou ne sort.

Le moteur Stirling, comme la plupart des moteurs thermiques, fonctionne selon quatre processus principaux : refroidissement, compression, chauffage et expansion. Ce processus est accompli en déplaçant le gaz entre les échangeurs de chaleur chauds et froids, avec un régénérateur entre les deux. La source chaude est en contact thermique avec une source de chaleur externe, telle qu'un brûleur à alcool, et l'échangeur de chaleur froid est en contact thermique avec un puits de chaleur externe, tel que des ailettes d'air. Un changement de température du gaz provoque un changement correspondant de la pression du gaz, tandis que le mouvement du piston provoque alternativement la compression et la dilatation du gaz[8].

Les gaz obéissent au comportement décrit par les lois des gaz qui décrivent comment le volume, la pression et la température d'un gaz sont liés. Lorsque le gaz est chauffé, parce qu'il se trouve dans une chambre étanche, la pression augmente et agit sur le piston moteur pour produire une course motrice. Au fur et à mesure que le gaz est refroidi, la pression diminue, ce qui signifie que le piston doit faire moins de travail pour comprimer l'air lors de la course de retour, produisant ainsi une puissance réelle.

En un mot, le moteur Stirling utilise la différence de température entre les extrémités chaudes et froides pour définir un cycle d'une masse fixe de gaz, qui est chauffée et dilatée, et refroidie et comprimée, convertissant ainsi une quantité de chaleur en énergie mécanique. Plus la différence de température est grande entre les sources chaude et froide, plus le rendement est important. Le rendement théorique maximal est équivalent au cycle de Carnot, cependant le rendement des moteurs réels est inférieur à cette valeur en raison des frottements et d'autres pertes. Dans le cas du moteur Stirling à faible différence de température (LTD), la différence de température entre la main et l'air ambiant peut être suffisante pour faire fonctionner le moteur.



Figure 2.4 – Moteur Stirling de type LTD

2.3 Types et catégories

2.3.1 Classification des moteurs Stirling selon leur fonctionnement

Les moteurs Stirling se divisent en deux catégories principales : machine motrice et machine réceptrice.

- Le moteur ou la machine motrice reçoit l'énergie thermique fournie par la source chaude et la convertit en énergie mécanique.
- La pompes à chaleur ou la machine réceptrice absorbent l'énergie mécanique et la transforment en chaleur, dont une partie est absorbée par la source froide, tandis que l'autre partie est rejetée dans la source chaude.
- La troisième catégorie de moteurs Stirling correspond à la catégorie des machines combinées qui utilisent deux systèmes thermiques précédents.

2.3.2 Classification selon leur configuration géométrique

Trois principales configurations existent pour le moteur Stirling : alpha, bêta, et gamma. Elles correspondent à des options technologiques dans la construction de la machine. Notons bien que ce type de moteur nécessite une précision extrême dans l'usinage. La description des configurations se limitera à des moteurs simples car il est possible de combiner plusieurs moteurs élémentaires pour obtenir une machine multicylindre. [9].

2.3.2.1 La configuration Alpha

Le moteur alpha est un moteur bicylindre : il est composé de deux pistons qui se déplacent dans deux cylindres différents ; ce qui lui permet de dissocier la source froide et la source chaude. Les pistons sont placés avec un angle de 90° afin que le piston de la source froide soit en retard de $\frac{1}{4}$ de tour sur le piston de la source chaude.

Le couplage cinématique permet au gaz de travail de se déplacer entre les deux pistons en traversant un régénérateur. Ce régénérateur récupère l'énergie du gaz chaud lorsque cet air est expulsé vers la source froide et la transmet dans le trajet inverse. Ceci permet d'éviter les pertes calorifiques.

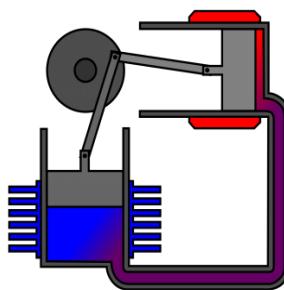


Figure 2.5 – Moteur Stirling de configuration Alpha

Ce type de moteur a un rapport puissance/volume élevé mais présente des problèmes techniques dus à la température généralement élevée du piston chaud, la durabilité de ses joints, aux frottements et à son étanchéité. Ainsi, le rendement du moteur Stirling Alpha n'est que de 45% ce qui est inférieur au rendement théorique du moteur Stirling. Mais il reste supérieur aux moteurs à explosion.

2.3.2.2 La configuration Bêta

Le moteur Beta est monocylindrique. Son seul cylindre contient la chambre froide et la chambre chaude. Ce moteur est composé d'un piston moteur et d'un plongeur qui déplace le volume du gaz de la partie froide à la partie chaude.

Avec cette configuration, on élimine tous les soucis de fiabilités liés au type alpha, en ne faisant plus travailler le piston de travail du côté chaud. Les deux pistons bougent suivant un axe de translation commun. Deux technologies cohabitent sous le même nom de moteur Stirling bêta. La première combine deux pistons étanches qui enferment un volume de gaz (comme dans le moteur alpha), à la différence près qu'ils sont coaxiaux.

La seconde est exactement similaire à la première, à l'exception du piston supérieur qui n'est pas étanche, et qui déplace le fluide lors de sa translation. C'est le modèle le plus courant.

Le cylindre utilisé par le piston est identique, ce qui provoque des pertes par conduction, cependant, le volume mort est minimal grâce au plongeur. Il est possible de placer le régénérateur à l'extérieur du cylindre sur un conduit de transfert du gaz. L'écart angulaire entre les fixations des deux bielles sur le volant d'inertie est d'exactement 90° pour respecter le cycle de Stirling.

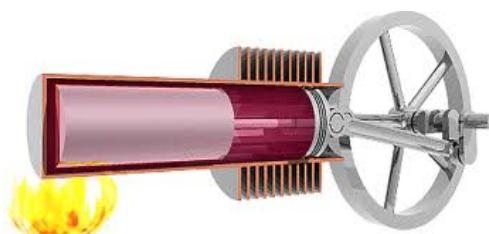


Figure 2.6 — Moteur Stirling de configuration Bêta

2.3.2.3 La configuration Gamma

C'est la configuration la plus ancienne et la plus encombrante. Ce moteur est bicylindre. Il est similaire au moteur bêta dans son procédé de fonctionnement. Cependant, les deux pistons ne partagent pas cette fois le même cylindre. L'avantage par rapport au moteur bêta est une construction simplifiée. Il n'est en effet pas nécessaire de se soucier de l'étanchéité entre la crosse du plongeur et le piston de travail. En revanche, le volume qu'occupe le piston plongeur au cours de son mouvement n'est pas parcouru par le piston moteur, ce qui crée un volume mort néfaste au rendement.

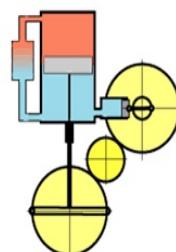


Figure 2.7 — Moteur Stirling de configuration Gamma

Cette configuration produit un rapport de compression plus faible, mais elle est généralement plus simple mécaniquement, et la plus adaptée au multicylindre.

2.4 Domaines d'application

La diversité des configurations de moteurs Stirling a permis d'élargir leurs champs d'applications, ce type de moteur a été utilisé dans plusieurs domaines d'activité variés, du fait de certaines de ses caractéristiques qui en font un choix particulièrement bien adapté à certaines situations, parmi ses applications [10] nous citons :

2.4.1 Production d'électricité

La technique Stirling solaire est considérée comme la plus efficace des méthodes de conversion de l'énergie solaire en électricité, environ deux fois plus efficace que les autres technologies solaires alternatives, un rendement supérieur à celui des cellules photovoltaïques. Cette technique consiste à concentrer le maximum des rayons solaires grâce à une parabole au centre duquel un récepteur est placé. Ce dernier permet d'augmenter la température d'un fluide de travail qui circule dans un moteur Stirling. Cette installation présente un rendement de conversion solaire-électrique assez élevé et présente un très faible impact sur l'environnement. La parabole Stirling est composée principalement des éléments suivants : un miroir parabolique, un moteur Stirling avec générateur, un capteur solaire ou récepteur et un système de poursuite du soleil.

Le 11 août 2005, « Southern California Edison » a annoncé un accord avec « Stirling Energy Systems (SES) » pour acheter de l'électricité créée à l'aide de plus de 30 000 moteurs Stirling alimentés par l'énergie solaire sur une période de vingt ans, suffisante pour générer 850 MW d'électricité. Ces systèmes, installés sur une ferme solaire de 19 km^2 .

En janvier 2010, quatre mois après avoir posé la première pierre, « Tessera Solar », partenaire de Stirling Energy, a achevé la centrale « Maricopa Solar » de 1,5 MW à Peoria, Arizona. La centrale est composée de 60 SES Scratcher, un grand collecteur parabolique à concentration d'énergie solaire (CSP) qui génère 25 kilowatts (kW) d'électricité en plein soleil. Chacun des collecteurs de 38 pieds de diamètre contient plus de 300 miroirs incurvés (héliostats) qui concentrent la lumière du soleil sur une unité de conversion de puissance, qui contient le moteur Stirling. En raison des préoccupations relatives à l'impact environnemental sur les animaux vivant sur le site, le projet a été fermé.



Figure 2.8 – Centrale de Maricopa, Arizona, Etats-Unis

2.4.2 Domaine spatial

Dans le domaine spatial, des laboratoires de la NASA ont développé un moteur Stirling moderne appelé le générateur Stirling à radio-isotope (SRG, pour Stirling Radio-isotopes Generator) conçu pour produire l'électricité pour les sondes lors de missions d'exploration spatiale. Le moteur utilise un seul déplaceur pour réduire les pièces mobiles et utilise un système acoustique à haute énergie pour transférer l'énergie. La source de chaleur est un combustible nucléaire solide sec qui va être excité par les rayonnements stellaires, et la source froide est l'espace lui-même.

Certains satellites se procurent de l'énergie grâce à la technologie Stirling qui demeure une solution intéressante en raison de ses bonnes performances énergétiques. Son rendement est particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles dans l'espace. Contrairement aux cellules photovoltaïques, qui constituent son principal concurrent possèdent un rendement de conversion d'énergie inférieur à 10%, et nécessitent l'emploi de très grands panneaux solaires.

2.4.3 Domaine militaire

Le moteur Stirling pourrait être bien adapté aux systèmes d'alimentation sous-marins où un travail électrique ou une puissance mécanique est nécessaire de manière intermittente ou continue. Certains pays, comme la Suède ou l'Australie, possèdent des sous-marins utilisant des moteurs Stirling (soit pour la propulsion, soit pour la génération d'électricité), l'intérêt étant ici le silence de fonctionnement, nécessaire à la furtivité. De plus, la combustion externe peut être réalisée avec du fuel et de l'oxygène déjà sous pression et les gaz d'échappements peuvent être directement rejetés dans l'eau de mer sans être comprimés au préalable, ce qui augmente l'autonomie en plongée et aussi dans un lieu isolé au manque d'électricité, elle peut servir au militaire de passer le message radio.

À titre d'exemple, le sous-marin SAGA (Submarine Assistance Great Autonomy), devenu opérationnel dans les années 1990, il a été propulsé par deux moteurs Stirling de puissance 75 kW pour chacun, alimentés en carburant diesel et en oxygène liquide. Ce système présente également un potentiel pour la propulsion des navires de surface, car la taille du moteur est moins préoccupante et le fait de placer la section du radiateur dans l'eau de mer plutôt qu'à l'air libre permet de le réduire. En 1996, la marine suédoise a mis en service trois sous-marins de la classe « Gotland ». En surface, ces bateaux sont propulsés par des moteurs diesel marins. Cependant, lorsqu'ils sont immergés, ils utilisent un générateur de type Stirling pour recharger les batteries ou fournir de l'énergie électrique pour la propulsion.

Le constructeur suédois « Kockums » a également fourni des moteurs Stirling au Japon, qui a l'intention d'en équiper tous ses nouveaux sous-marins par des générateurs Stirling.

2.4.4 Domaine de l'informatique

Refroidissement des puces : MSI (Micro-Star International), une société basée à Taïwan qui fait partie des plus grands constructeurs de matériels informatiques au monde, a mis au point en 2008, un système de refroidissement pour les puces d'ordinateurs personnels, il s'agit d'un micromoteur Stirling qui utilise l'énergie thermique dissipée par le microprocesseur, ce petit moteur actionne un ventilateur qui dissipe le reste de chaleur évacué par le micro-processeur.

Il n'y a donc pas besoin d'énergie électrique supplémentaire pour assurer cette fonction de refroidissement contrairement à ce qui se passe sur un ordinateur usuel.



Figure 2.9 – Microprocesseur refroidi par moteur Stirling

2.4.5 Domaine de cogénération

La cogénération est la production séquentielle ou simultanée de plusieurs formes d'énergie utile (généralement mécanique et thermique) dans un système unique et intégré. Les systèmes de cogénération sont constitués de : moteur thermique, générateur, récupérateur de chaleur et interconnexion électrique.

Des systèmes de cogénération sont commercialisés, ils sont composés d'une chaudière classique qui fournit la chaleur aux habitations et un moteur Stirling couplé à cette dernière qui récupère les pertes de chaleur pour les convertir en énergie mécanique puis en électricité. Dans le contexte actuel d'économie des énergies et d'efficacité énergétique, ce genre d'installation pourrait représenter un bon débouché pour le moteur Stirling.



Figure 2.10 – Chaudière à bois Stirling

2.4.6 Domaine de transport

Le moteur Stirling est une alternative intéressante à la turbine à gaz pour la production d'électricité dans les voitures hybrides et ceci grâce à son faible niveau de pollution et son excellent rendement. Pour cette application le moteur Stirling est utilisé pour charger continuellement et peu à peu les batteries de véhicules électriques ; ce qui permet d'augmenter leurs autonomies.

En 1969, un partenariat avec General Motors conduisit la firme automobile à produire une Opel KADETT hybride, la « Stir-Lec-i », dont les roues arrière sont entraînées par un moteur électrique alimenté par des batteries au plomb, ces dernières étant rechargées par un moteur Stirling.

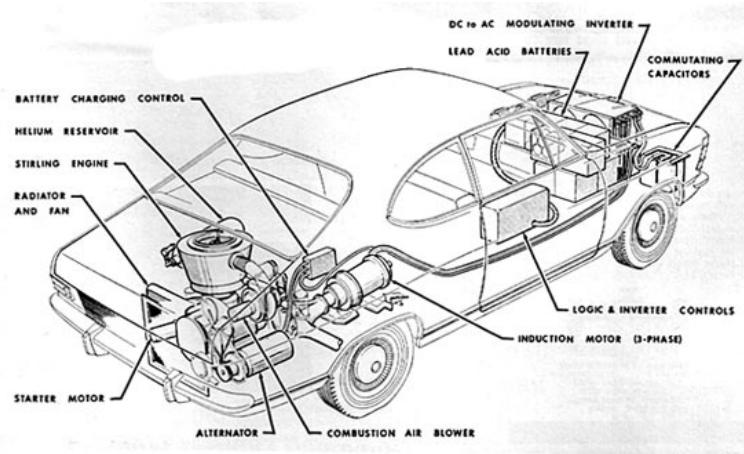


Figure 2.11 – Opel Kadett Stir-Lec-i, 1969

En novembre 2007, un prototype de voiture hybride a été annoncé par le projet PRECER en Suède. Le principe de base : un moteur Stirling qui peut être alimenté aux granulés de bois, au bois déchiqueté ou toute autre biomasse solide, dont le mouvement fait fonctionner un alternateur qui génère l'énergie électrique nécessaire aux moteurs de véhicules hybride.

2.4.7 Domaine industriel

Du fait de la réversibilité du moteur Stirling, il peut générer du froid à des fins industrielles, avec un rendement considérable.

A titre d'exemple : le « STM 4-120 », un moteur Stirling de quatre pistons à double effet qui transfèrent un gaz (hélium ou hydrogène) et récupèrent l'énergie. Leur placement axial permet un faible encombrement et une bonne compacité de l'ensemble. Ce moteur peut fournir 30 kW et a une durée de vie de 60 000 heures sans entretien. Sa vitesse de rotation est de 1800 tr/min et le rendement atteint 40 %.

2.5 Principaux composants

Un moteur Stirling est constitué d'un certain nombre de composants de base, dont la conception peut varier selon le type et la configuration. Les plus fondamentaux sont décrits ci-dessous :

2.5.1 Source de chaleur

La source de chaleur peut être fournie par la combustion de d'un carburant, les produits de combustion ne se mélangent pas avec le fluide de travail et n'entrent donc pas en contact avec les parois internes du moteur.

D'autres sources de chaleur possibles comprennent l'énergie nucléaire, l'énergie géothermique, l'énergie solaire concentrée, la bioénergie et la chaleur résiduelle.

2.5.2 Réchauffeur / échangeur de chaleur côté chaud

Dans un moteur de faible puissance, il peut s'agir uniquement des parois exposées à la source chaude, mais lorsqu'une puissance plus élevée est requise, une plus grande surface est nécessaire pour transférer suffisamment de chaleur. Les déploiements typiques sont des ailettes intérieures et extérieures ou plusieurs tubes de petit diamètre.

Un moteur fonctionnant à puissance et pression élevées nécessite des échangeurs de chaleur côté chaud constitués de matériaux de haute qualité, d'alliages avec une résistance thermique considérable, pour ne pas s'endommager au fluage.

2.5.3 Cylindre et piston de puissance

Cette pièce est composée d'une tête de piston et d'une bielle coulissante dans un cylindre hermétique. Le piston assisté est chargé de transmettre la puissance du gaz de travail au volant d'inertie. De plus, il comprime le fluide de travail au retour, avant le cycle de chauffage. En raison de l'exigence d'une étanchéité parfaite, c'est la partie la plus importante de la conception et de la fabrication.

2.5.4 Piston plongeur

Le plongeur est un piston spécial, utilisé pour déplacer le gaz de travail entre les échangeurs de chaleur chaud et froid. Selon le type de conception du moteur, le plongeur peut ou non être scellé au cylindre, c'est-à-dire qu'il s'ajuste librement dans le cylindre et permet au gaz de travail de passer autour de lui lorsqu'il se déplace pour occuper la partie du cylindre située au-delà.

2.5.5 Volant d'inertie

Le volant d'inertie est relié à la puissance de sortie du piston moteur, et sert à stocker de l'énergie, et fournir un élan pour le bon fonctionnement du moteur. Il est fabriqué avec un matériau lourd tel qu'acier, pour un stockage optimal de l'énergie.

2.5.6 Régénérateur

Le régénérateur d'un moteur Stirling est un échangeur de chaleur interne qui permet de stocker la chaleur temporairement, il est placé entre les espaces chaud et froid, de sorte que le fluide de travail le traverse d'abord dans un sens puis dans l'autre, en échangeant la chaleur alternativement.

Le régénérateur est un simple tube qui peut contenir de treillis métallique ou de la mousse, et bénéficie d'une grande surface, d'une haute résistance à la chaleur, d'un faible frottement d'écoulement et d'une faible conductivité. Par conséquent, sa fonction d'échange de chaleur permet au rendement du cycle de Stirling d'atteindre le rendement limite de Carnot.

2.5.7 Refroidisseur / échangeur de chaleur côté froid

Dans un petit moteur de faible puissance, il peut s'agir simplement de la paroi exposée à la température ambiante, mais lorsqu'une puissance plus élevée est requise, un refroidisseur qui utilise un ventilateur ou bien un liquide tel que l'eau est nécessaire pour absorber suffisamment de chaleur.

2.6 Le système parabole/Stirling

2.6.1 Description générale du système

Une voie essentielle dans le développement du solaire thermodynamique est d'utiliser un module Parabolique/Stirling de faible puissance. Cette application permet un fonctionnement à proximité du consommateur. Elle forme une plate-forme de production décentralisée et donne un meilleur rendement.

Le système convertit la chaleur due aux radiations solaires en énergie électrique. Il possède trois principaux éléments :

- Le concentrateur parabolique
- Le récepteur solaire
- Le moteur Stirling couplé à un alternateur

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

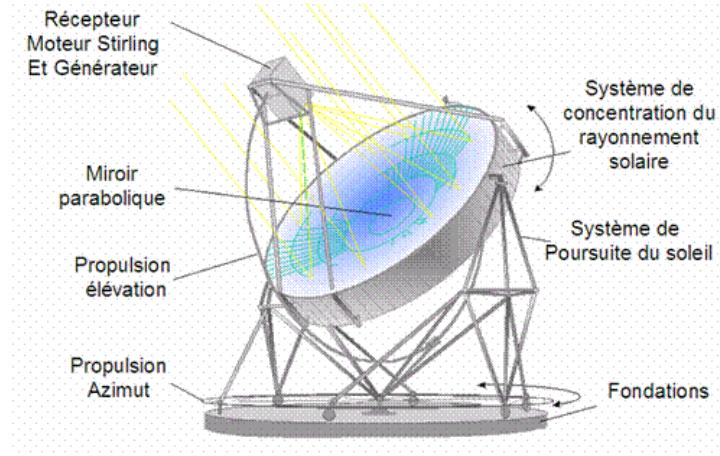


Figure 2.12 – Description du système Dish-Stirling

Pour le concentrateur parabolique, on utilise une surface réfléchissante qui concentre les rayons lumineux dans une zone appelée foyer. La parabole doit être régulièrement pointée vers le soleil pour un maximum d'effet.

Les miroirs réfléchissants des paraboles sont de trois types :

- Plaques de verre sur lesquelles sont déposés des dépôts d'argent ou d'aluminium à l'arrière. Il est basé sur le même principe que le miroir domestique traditionnel. L'épaisseur de la couche de verre est très fine, inférieure à 1mm. Et la réflectivité peut atteindre 95%.
- On peut remplacer la plaque de verre par un film plastique flexible et moins coûteux. Sa durée de vie est limitée en raison des rayons ultras violets.
- Feuilles d'aluminium polies, elles sont peu chères mais ont une faible réflectivité qui peut atteindre 85%.

La chaleur reçue est transférée au moteur Stirling. Si le réchauffeur du moteur est placé au point focal de la parabole, la chaleur du soleil va dilater un fluide comprimé afin de générer de l'électricité. En effet, à ce stade, le moteur Stirling récupère toute la chaleur fournie par le soleil au réflecteur. Il fonctionne en augmentant la température et la pression d'un gaz contenu dans une enceinte étanche.

Ainsi, il travaille à convertir cette énergie thermique en énergie mécanique. Un alternateur relié directement au vilebrequin du moteur, convertit l'énergie mécanique en courant alternatif (énergie électrique).

2.6.2 Étude théorique du système parabole/Stirling

2.6.2.1 Les propriétés optique et géométrique de parabole

Une parabole est définie comme l'ensemble des points R équidistants d'un point fixe appelé foyer (F), et d'une droite fixe (D) appelé la directrice. Le sommet (V) est le point d'intersection de parabole et de son axe qui représente l'intermédiaire entre le foyer et la directrice [11], voici les paramètres géométriques fondamentaux de la parabole :

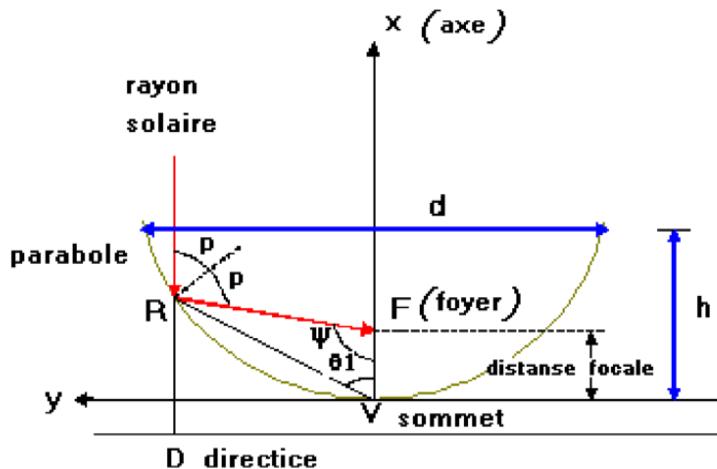


Figure 2.13 – Propriétés géométriques de la parabole

- L'équation de la parabole est :

$$y^2 = 4.f.x \quad (2.1)$$
- f** : La distance focale (FV).
- Le rayon parabolique p, (distance (RF) entre la courbe de la parabole et le foyer) est :

$$p = \frac{2.f}{1 + \cos(\psi)} \quad (2.2)$$
- ψ** : L'angle mesuré à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique (P).
- L'angle d'ouverture d'une parabole est défini par :

$$\tan(\psi_p) = \frac{\frac{f}{d}}{2.(\frac{f}{d}) - \frac{1}{8}} \quad (2.3)$$

d : Le diamètre de l'ouverture de la parabole.

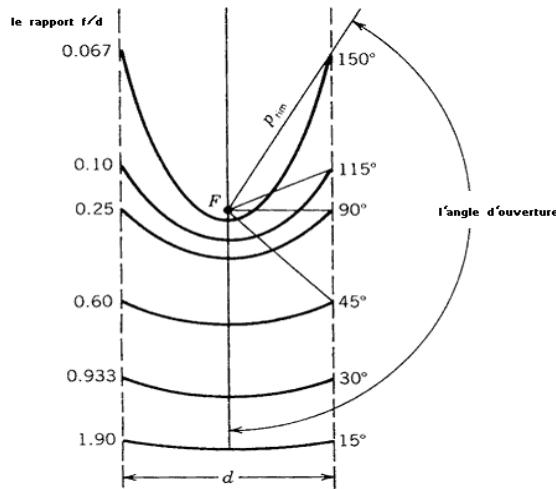


Figure 2.14 — Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d

⇒ Une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate. Ainsi, l'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale.

- La taille de la courbe parabolique h est la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole :

$$h = \frac{d^2}{16.f} \quad (2.4)$$

- La surface d'une parabole : c'est l'aire inclue entre la parabole et la ligne d'ouverture d, elle est définie par :

$$A_x = \frac{2}{3}.d.h \quad (2.5)$$

- La longueur d'arc d'une parabole S est décrite par la formule :

$$S = \left[\frac{d}{2} \times \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] + 2.f \ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] \quad (2.6)$$

⇒ En effet, la parabole est une figure plane, contrairement à un réflecteur parabolique qui est tridimensionnel et qui correspond à un paraboloïde, on peut aboutir à cette forme géométrique par une rotation autour de l'axe de symétrie d'une parabole.

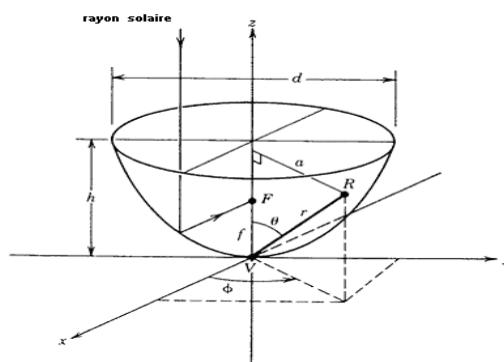


Figure 2.15 — Paraboloïde de révolution

- L'équation du paraboloïde :

$$x^2 + y^2 = 4.f.z \quad (2.7)$$

avec $z = \frac{a^2}{4.f}$ et l'axe (Z) : axe de symétrie.

- La surface du paraboloïde peut être trouvée en intégrant l'équation de l'élément différentiel de surface : $dA_s = 2.\pi.a.\sqrt{dz^2 + da^2}$

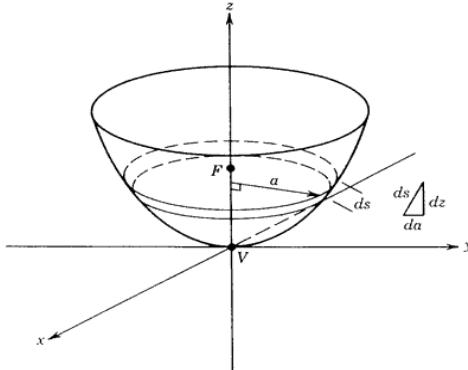


Figure 2.16 – Élément différentiel de surface parabolique

On va obtenir :

$$A_s = 8.\pi.f^2 \cdot \left[\left[\left(\frac{d}{4.f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}} + 1 \right] \quad (2.8)$$

- La surface d'ouverture d'un paraboloïde est :

$$A_a = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4.\pi.f^2 \cdot \left(\frac{\sin^2(\psi_p)}{(1 + \cos(\psi_p))^2} \right) \quad (2.9)$$

Selon la loi de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le point focal. Par conséquent, cette propriété fondamentale de la réflexivité de parabole permet une concentration optimale des rayons solaires au foyer, et donc une forte température transmise au fluide de travail.

On dit que ces miroirs sont rigoureusement stigmatiques, et pour cette raison, les concentrateurs solaires utilisent des miroirs paraboliques et non sphériques, car ces derniers étant soumis à des aberrations (déformation optique) sphériques.

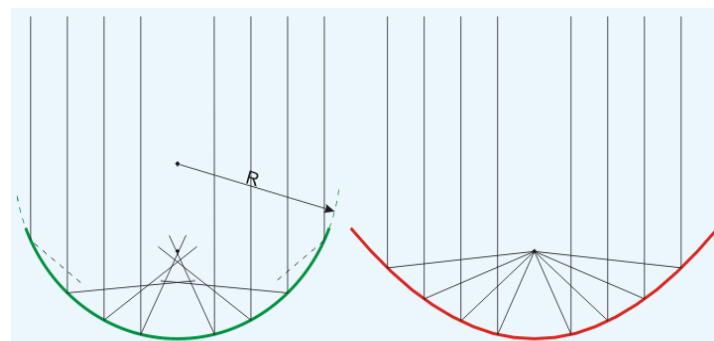


Figure 2.17 – Comparaison entre le miroir sphérique (à gauche) et le miroir parabolique (à droite)

2.6.2.2 Bilan thermique du récepteur

Un tel dispositif comme le concentrateur solaire parabolique, est considéré un convertisseur thermodynamique. Il nécessite une analyse de son bilan énergétique en tenant compte des conditions d'utilisation afin de calculer son rendement, puisque le rendement est le paramètre clé pour évaluer la performance d'un système[12].

Pour cet objectif, nous allons effectuer une étude générale du bilan énergétique de ce convertisseur. Et voici les notations qui seront par suite utilisées dans le calcul :

I	: Irradiation solaire, en W/m^2 .
P_c	: Puissance captée par le réflecteur, exprimée en watt (W).
P_a	: Puissance absorbée par le récepteur, exprimée en watt (W).
P_u	: Puissance utile, en (W).
P_{th}	: Pertes thermiques, en (W).
P_{cnd}	: Pertes par conduction, en (W).
P_{cnv}	: Pertes par convection, en (W).
P_{ray}	: Pertes par rayonnement, en (W).
S_{ref}	: Surface de captation du réflecteur, en m^2 .
S_{rec}	: Surface de la cavité réceptrice, en m^2 .
T_{rec}	: Température du récepteur, en Kelvin (K).
T_{amb}	: Température du milieu ambiante, en Kelvin (K).
α	: Coefficient d'absorption de la surface de l'absorbeur.
τ	: Coefficient de transmission de l'absorbeur.
ρ	: Coefficient de réflexion de surface de réflecteur (miroir du concentrateur).
Γ	: Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur), $\Gamma = \frac{(S_{ref}-S_{rec})}{S_{ref}}$.
η_{opt}	: Le rendement optique du concentrateur, $\eta_{opt} = \alpha \cdot \tau \cdot \rho \cdot \Gamma$.
ϵ	: Émissivité de l'absorbeur.
σ	: Constante de Stephan-Boltzmann, est égale à $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.
Δx	: Épaisseur de l'absorbeur, en (m).
λ	: Coefficient d'échange convectif, exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
h_{cnv}	: Coefficient d'échange convectif, exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Un réflecteur à surface de captation S_{ref} , d'un concentrateur dirigé vers le soleil qui reçoit une irradiation I , sa puissance captée :

$$P_c = I \cdot S_{ref} \quad (2.10)$$

Cette puissance captée est réfléchie sur la cavité du récepteur(absorbeur) :

$$P_a = \eta_{opt} \cdot P_c \quad (2.11)$$

⇒ La différence de température importante entre celle de la cavité réceptrice T_{rec} et l'ambiance T_{amb} provoque un processus naturel de déperdition thermique par conduction, convection et rayonnement.

$$P_{th} = P_{cnd} + P_{cnv} + P_{ray} \quad (2.12)$$

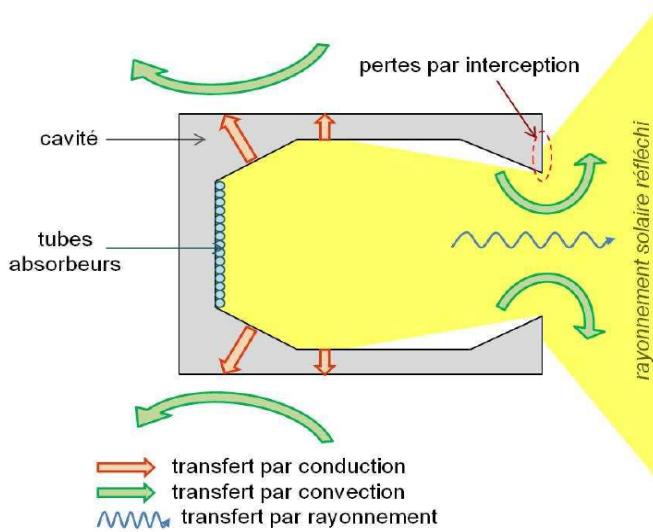


Figure 2.18 – Représentation des pertes dans un récepteur Parabole-Stirling

Donc, la puissance thermique utile transmise par la cavité réceptrice au fluide de travail est :

$$P_u = P_a - P_{th} \quad (2.13)$$

○ Pertes par conduction sont liées à la nature du matériel utilisé :

$$P_{cnd} = \lambda \cdot S_{rec} \cdot \Delta x \cdot (T_{rec} - T_{amb}) \quad (2.14)$$

○ Pertes par convection, la convection est liée à la vitesse et la direction du vent sur le site, ces pertes sont proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant :

$$P_{cnv} = h_{cnv} \cdot S_{rec} \cdot (T_{rec} - T_{amb}) \quad (2.15)$$

○ Pertes par rayonnement, ces pertes dépendent de la température du récepteur, elles sont proportionnelles à l'émissivité de l'absorbeur :

$$P_{ray} = \epsilon \cdot \sigma \cdot S_{rec} \cdot (T_{rec}^4 - T_{amb}^4) \quad (2.16)$$

⇒ Les pertes par conduction sont négligeables devant les pertes par convection ou par rayonnement, donc :

$$P_{th} = S_{rec} \cdot [h_{cnv} \cdot (T_{rec} - T_{amb}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)] \quad (2.17)$$

Ainsi, on va aboutir à cette relation globale de la puissance utile du concentrateur :

$$P_u = \eta_{opt} \cdot I \cdot S_{ref} - S_{rec} \cdot [h_{cnv} \cdot (T_{rec} - T_{amb}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)] \quad (2.18)$$

Le rendement est le rapport de l'énergie thermique transmis par le récepteur au fluide sur l'énergie reçue par le concentrateur :

$$\eta = \frac{P_u}{P_c} = \eta_{opt} - \frac{S_{rec} \cdot [h_{cnv} \cdot (T_{rec} - T_{amb}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)]}{S_{ref} \cdot I} \quad (2.19)$$

On pose :

$$K_{cnv} = \frac{h_{env} \cdot T_{amb}}{I} ; \text{ coefficient de perte par convection de la cavité réceptrice.}$$

$$K_{ray} = \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_{amb}^4}{I} ; \text{ coefficient de perte par rayonnement de la cavité réceptrice.}$$

$C_g = \frac{S_{ref}}{S_{rec}}$; facteur de concentration géométrique du concentrateur, c'est un coefficient qui permet de caractériser l'efficacité du système concentrateur, on parle souvent de « nombre de soleils ». Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte au niveau du foyer est élevée.

$$\text{Et : } \theta = \frac{T_{rec}}{T_{amb}}.$$

Ainsi :

$$\boxed{\eta = \eta_{opt} - \frac{K_{cnv}}{C_g} \cdot (\theta - 1) - \frac{K_{ray}}{C_g} \cdot (\theta^4 - 1)} \quad (2.20)$$

2.6.2.3 Cycle de Stirling

Le moteur Stirling est considéré une machine motrice à source chaude externe. Son principe de fonctionnement n'a pu être expliqué qu'après avoir assumé le 1er et le 2ème principe de thermodynamique. Il fonctionne selon un cycle fermé basé sur le processus de régénération isochore et isotherme de compression et de détente, appelé le cycle de Stirling [13].

Le cycle de Stirling idéalisé consiste en quatre processus thermodynamiques agissant sur le fluide de travail :

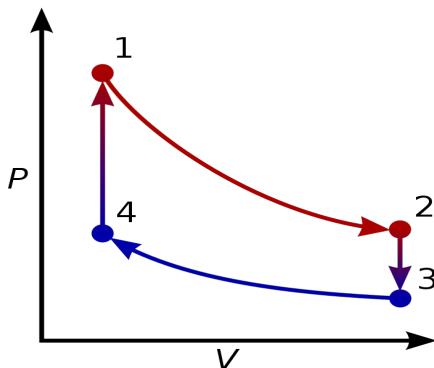


Figure 2.19 – Diagramme Clapeyron du cycle Stirling théorique

1-2. Détente isotherme : L'espace d'expansion et l'échangeur de chaleur associé sont maintenus à une température élevée constante, le gaz absorbe la chaleur et augmente isothermiquement en volume agissant ainsi sur le piston de puissance, le moteur génère le travail du cycle.

2-3. Refroidissement isochore : Le piston plongeur transfère tout le gaz à travers le régénérateur vers l'extrémité froide. En traversant le régénérateur, le gaz se refroidit, abais- sant ainsi sa température jusqu'à celle de la partie froide. La diminution de température est accompagnée par une diminution considérable de la pression et un transfert de chaleur au régénérateur pour l'utiliser dans le cycle suivant.

3-4. Compression isotherme : L'espace de compression et l'échangeur de chaleur associé sont maintenus à une basse température constante, le piston de puissance comprime le gaz à la température froide, par conséquent rejette la chaleur vers le puits froid. Puisque le travail effectué est à la basse pression, moins de travail est exigé pour la compression que celui obtenu à partir de la détente isotherme.

4-1. Chauffage isochore : Le piston plongeur transfère tout le gaz à travers le régénérateur vers l'extrémité chaude. Le gaz récupère une grande partie de la chaleur transférée au régénérateur lors du refroidissement isochore, en se réchauffant sur son chemin vers l'espace d'expansion. Sa température s'élève et atteint celle de l'espace chaud, et la pression augmente de manière significative, ainsi le système revient à ses conditions initiales.

Théoriquement, la chaleur est fournie au fluide de travail dans le processus **1-2** où le gaz se dilate isothermiquement ($T_1=T_2$). De plus, la chaleur est rejetée vers un puits de chaleur externe dans le processus **3-4** où le gaz est comprimé de manière isotherme ($T_3=T_4$). Les deux isothermes sont reliés par les processus **2-3** et **4-1** à volume constant, au cours desquels les changements de température sont égaux à **T1** et **T3**.

2.6.2.4 Calcul du rendement théorique du moteur Stirling

Le rendement est le rapport entre l'énergie totale fournie au moteur et l'énergie totale récupérée par la sortie. Pour un moteur Stirling, l'énergie récupérée est le travail mécanique, tandis que l'énergie fournie est la quantité de chaleur apportée par une source de chaleur externe.

Avant de calculer le travail et la quantité de chaleur échangée à chaque transformation, on rappelle qu'en thermodynamique, par convention, l'énergie reçue par le système est positive et l'énergie cédée par le système est négative.

Voici les notations utilisées dans le calcul :

W_{ij}	Travail échangé lors de la transformation $i - j$, exprimé en Joules (J).
Q_{ij}	Quantité de chaleur échangée lors de la transformation $i - j$, en Joules (J).
U	Énergie interne du système en Joules (J).
P	Pression en Pascals (Pa).
V_i	Volume au point i en (m^3).
T_i	Température au point i en Kelvin (K).
R	Constante des gaz parfaits, est égale à $8.32 J.mol^{-1}.K^{-1}$.
ΔX	Variation de la variable X .
n	Quantité de matière en moles (mol).
C_v	Capacité calorifique à volume constant, en $J.mol^{-1}.K^{-1}$.

Le moteur étudié est considéré comme un système fermé, c'est-à-dire il n'y a pas de transfert de matière avec le milieu extérieur (masse fixe de gaz), contrairement à l'énergie, la chaleur vient d'une source extérieure et peut être dissipée par des transformations thermodynamiques.

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

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W \quad (2.21)$$

Pour un système immobile et où les différences d'altitude sont négligées, on écrit :

$$\Delta U = Q + W \quad (2.22)$$

⇒ On note que : $V_1 = V_4 = V_{min}$ et $V_2 = V_3 = V_{max}$.

De plus : $T_4 = T_3 = T_{froid}$ et $T_1 = T_2 = T_{chaud}$.

⇒ Equation d'état des gaz parfaits : $P.V = n.R.T$

⇒ Transformation isotherme : $T = cste \Rightarrow dT = 0$

⇒ Transformation isochore : $V = cste \Rightarrow dV = 0$

Calcul des travaux et quantités de chaleur échangés pour chaque transformation :

1-2 : Détente isotherme

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} -P.dV = -n.R.T_c \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = -n.R.T_c \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (2.23)$$

$$Q_{12} = -W_{12} = n.R.T_c \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (2.24)$$

2-3 : Refroidissement isochore

$$W_{23} = \int_{V_2}^{V_3} -P.dV = 0 \quad (2.25)$$

$$Q_{23} = n.C_v \cdot \Delta T = n.C_v \cdot (T_3 - T_2) = n.C_v \cdot (T_f - T_c) \quad (2.26)$$

3-4 : Compression isotherme

$$W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} -P.dV = -n.R.T_f \cdot \int_{V_3}^{V_4} \frac{dV}{V} = n.R.T_f \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (2.27)$$

$$Q_{34} = -W_{34} = -n.R.T_f \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \quad (2.28)$$

4-1 : Chauffage isochore

$$W_{41} = \int_{V_4}^{V_1} -P.dV = 0 \quad (2.29)$$

$$Q_{41} = n.C_v \cdot \Delta T = n.C_v \cdot (T_1 - T_4) = n.C_v \cdot (T_c - T_f) \quad (2.30)$$

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

$$W_{Total} = \sum_{cycle} W_{ij} = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = n.R.(T_f - T_c) \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

⇒ Puisque $W_{Total} < 0$, alors le travail est fourni par le système.

La quantité totale de chaleur fournie au cycle est donnée pendant les étapes **4-1** et **1-2** :

$$Q_{Total} = \sum_{cycle} Q_{ij} = Q_{12} + Q_{41} = n.R.T_c \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + n.C_v \cdot (T_c - T_f)$$

On peut maintenant calculer le rendement du cycle de Stirling :

$$\eta = \frac{|W_{Total}|}{Q_{Total}} = \frac{\left|R.(T_f - T_c) \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)\right|}{R.T_c \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + C_v \cdot (T_c - T_f)} \quad (2.31)$$

Le rendement obtenu est inférieur à celui du cycle de Carnot mais peut être augmenté à l'aide d'un régénérateur qui permet d'emmagasiner la chaleur lors du refroidissement isochore Q_{23}

pour la restituer lors du chauffage isochore Q_{41} .

Avec le régénérateur, on a Q_{41} consommée = 0 ,car elle provient de Q_{23} , on obtient ainsi :

$$\eta = \frac{|W_{Total}|}{Q_{Total}} = \frac{\left| R.(T_f - T_c).ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \right|}{R.T_c.ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} = \frac{|T_f - T_c|}{T_c}$$

$$\boxed{\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c}}$$

(2.32)

En présence d'un régénérateur, le rendement thermique théorique d'un moteur Stirling idéal est égal à celui de l'hypothétique cycle de Carnot, c'est-à-dire le rendement le plus élevé possible.

Cependant, bien qu'il soit utile pour illustrer les principes généraux, le cycle idéal s'écarte considérablement des moteurs Stirling pratiques, car il est basé sur ces 4 hypothèses :

- Le fluide de travail est un gaz idéal.
- La résistance à la conduction et à l'écoulement est négligeable.
- Les pertes par frottement sont négligées.
- Expansion et contraction isothermes.

Mais en réalité, d'autres problèmes réduisent l'efficacité des moteurs réels, en raison des limites du transfert de chaleur par convection et du flux visqueux (friction). Il existe également des considérations mécaniques pratiques, des limites imposées par les matériaux disponibles, comme les propriétés non idéales du gaz de travail, la conductivité thermique, la résistance à la traction, le fluage, la résistance à la rupture et le point de fusion.

Le cycle réel peut être représenté sur un diagramme pression-volume (Clapeyron) sous la forme d'une courbe fermée avec une forme presque elliptique, cette courbe est représentée par différentes valeurs de pression et de température obtenues pratiquement, un cycle Stirling réel ressemble à cette forme :

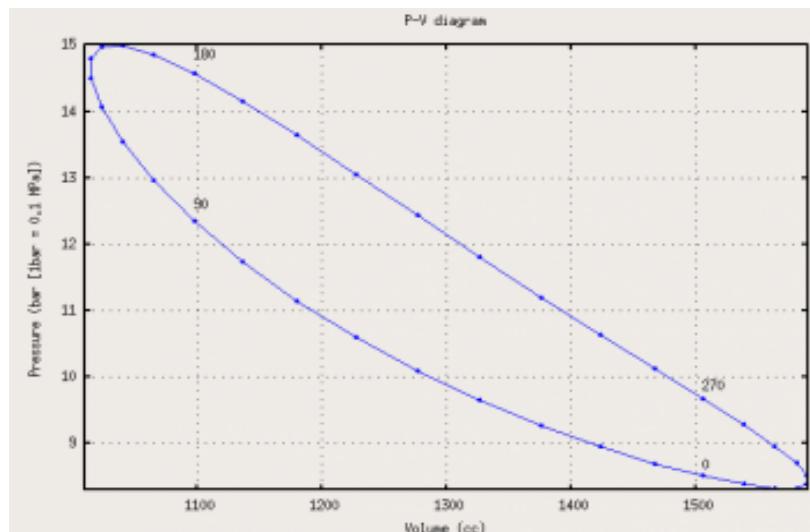


Figure 2.20 – Cycle Stirling réel

Chapitre 3

Élaboration d'un TP sur le moteur Stirling

3.1 La fiche TP

1. Objectifs

Ce TP a pour objectif d'étudier un moteur à air chaud fonctionnant en cycle thermodynamique fermé, dit cycle de Stirling. Ce moteur connu sous le nom de moteur de Stirling peut être utilisée soit comme moteur thermique soit comme récepteur (réfrigérateur).

A l'aide d'accessoires de mesures, on pourra relever les grandeurs physiques relative à ce moteur : La température dans la source chaude et la source froide, le volume et la pression dans la chambre de détente et de compression, la vitesse de rotation du vilebrequin, puis on exploite ces données pour déterminer l'énergie mécanique fournie et tirer le diagramme PV, ainsi en déduit le rendement thermomécanique.

Ce TP permet une étude thermodynamique approfondie du fonctionnement du moteur, et de savoir plus sur :

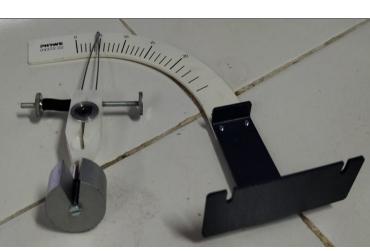
- Les transformations isochores et isothermiques
- Les lois régissant les gaz
- Le cycle Stirling
- La conversion d'énergie
- Le rendement

De plus, il a pour but de montrer l'avantage majeur qu'il présente ce moteur, les nombreuses sources chaudes susceptibles d'être utilisées pour l'animer, dont on va s'intéresser à deux types un combustible(alcool) et l'énergie solaire à concentration.

2. Précautions et recommandations

- Avant de commencer, on doit vérifier tout d'abord que la source de chaleur contienne de l'alcool, il faut la remplir jusqu'au presque la moitié.
- Cessez de remplir au d'ajout lorsque la flamme brûle.
- Fermer bien la bouteille après son utilisation.
- Gardez-vous loin de la flamme et pas touchez les cylindres lors des essais ou bien quand l'expérience termine, laissez le moteur se refroidir.
- Faites attention, ce modèle de moteur est dédié au travaux pratiques est très fragile.

3. Outils utilisés

	Moteur Stirling (Vitesse de rotation à vide $800\text{tr}/\text{min}$, Puissance max. 1W)
	Appareil de mesure $pVnT$
	Unité de détection pVn
	Unité de base cobra 3
	Alimentation CC (Limite de courant réglable 0-12 V ; 0-2 A /max. 24 VA)
	Unité moteur/générateur (Tension moteur max. 12V, Lampe à incandescence 4V/40mA, Diamètre de la courroie 150mm)
	Torsiomètre (Plage de mesure 25.10^{-3} N.m, Résolution 1.10^{-3} N.m)

	Brûleur à alcool + Seringue à gaz
	Thermocouple + Câbles
	Oscilloscope
	Wattmètre

Table 3.1 – Les outils utilisés dans la manipulation

4. Montage et mode opératoire [14]



Figure 3.1 – Montage expérimental : Moteur Stirling

Avant de mettre sous tension l'unité de mesure $pVnT$, assurez-vous qu'elle est connectée à l'unité de détection pVn . Connectez les sorties analogiques p et V aux voies Y1 et Y2 de l'oscilloscope numérique.

i) Étalonnage des détecteurs

a) Température : Allumez l'unité de mesure $pVnT$. Les deux thermocouples doivent être à température ambiante. L'unité de mesure indiquée est "cal", puis appuyez sur le bouton "Calibration ΔT ".

b) Volume du cylindre : La partie supérieure de l'unité de mesure indique alors "OT", cette indication doit correspondre à la valeur minimale du volume du cylindre. Pour cela, placez le piston de la chambre de compression dans sa position la plus basse en actionnant l'arbre du moteur dans le sens des aiguilles d'une montre. Appuyez sur le bouton "Calibration V". Alors la tension correspondant au plus petit volume sera nulle.

c) Pression : Débranchez le tuyau de la base du détecteur pVn et laissez-le connecter au capteur. Le capteur est alors à la pression atmosphérique P_{atm} . Cette pression doit être considérée comme égale à 1013 hPa. Vous pouvez lire la tension correspondante sur l'oscilloscope en mode DC. Mettez 20 ml d'air dans une seringue et raccordez-la au capteur de pression via le tuyau flexible. En comprimant lentement l'air dans la seringue, vous faites subir à l'air dans la seringue et dans le capteur de pression une compression isotherme. Notez la tension correspondant à chaque valeur de volume jusqu'à 15 ml. Convertissez ce volume en pression en utilisant l'équation des gaz parfaits. Procéder de la même manière lors de la phase de détente : introduire 15 ml d'air dans la seringue, connecter la seringue au capteur, et réaliser une détente isotherme lente jusqu'à 20 ml. Tracez ensuite la pression en hPa en fonction de la tension en Volts. Vous pouvez alors déterminer la sensibilité en Pascal/Volt du capteur de pression : S_P ainsi que l'offset de pression. Ne pas oublier de rebrancher le tube au moteur.

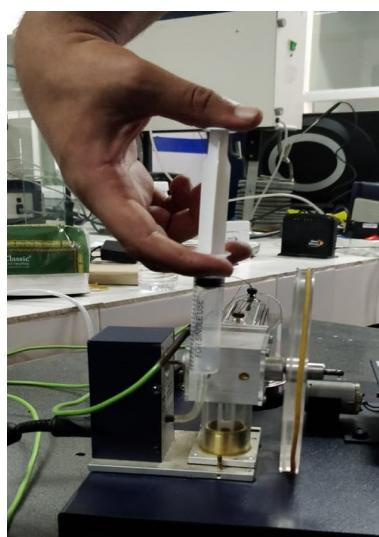


Figure 3.2 – Étalonnage du capteur de pression

ii) Remarques

- Une mauvaise calibration du volume minimum entraînera des distorsions dans le diagramme PV.
- Une mauvaise calibration des températures ne vous permettra pas de calculer les rendements correctement.
- Une mauvaise calibration de la pression ne vous permettra pas de faire des mesures quantitatives sur le diagramme PV.
- Ces opérations peuvent être à refaire en cours de séance au cas où le déphasage entre les mesures de volume et pression se modifierait.

iii) La visualisation de cycle par l'unité Cobra3

- Alimentez l'unité de base Cobra3, ensuite connectez le avec votre ordinateur via un connecteur USB, puis lancez le programme “measure” sur votre ordinateur et sélectionnez la jauge “Cobra3 Universal Writer”, et suivez les réglages suivants :

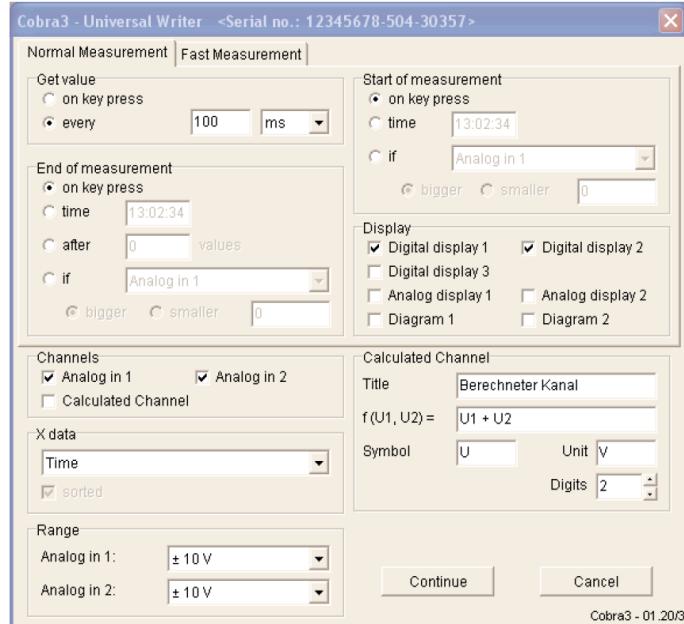


Figure 3.3 – Réglages pour l'étalonnage de la pression

- Lancez la mesure avec le bouton "Continuer" et faites tourner le moteur lentement et régulièrement à la main quelques cycles pour n'avoir qu'une modification isotherme avec l'air à l'intérieur du moteur de sorte que $p.V = \text{cste}$. Il ne doit pas y avoir de déphasage entre le volume et la pression! Arrêtez la mesure et mettez à l'échelle l'axe du volume en sélectionnant “Analyse” > “Modification du canal” pour obtenir le volume réel avec : $f := 32 + U1 * 12/5$ puisque la tension U1 varie entre 0 et 5 Volt avec le déplacement du piston de 32 à 44 cm^3 (différence 12 cm^3) de volume moteur.

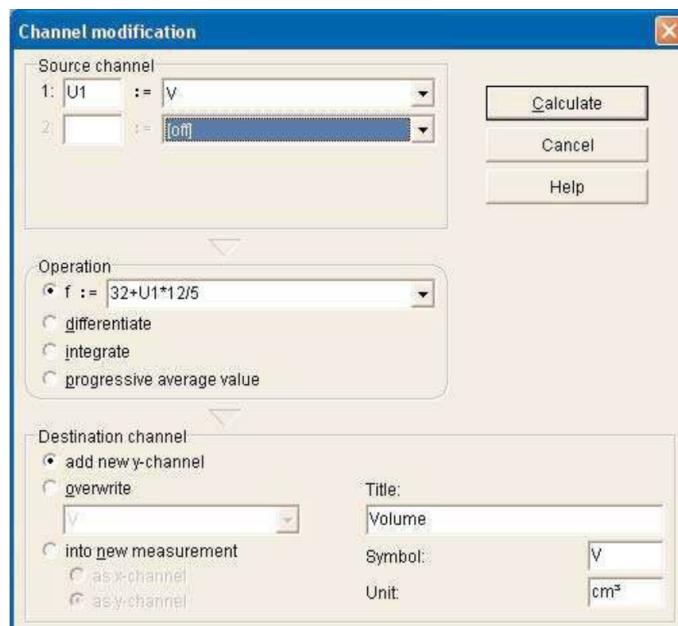


Figure 3.4 – Modification du canal

- Si l'on considère l'OT comme un point dont la pression est la même que celle de l'environnement, on peut déduire la pression p par $p.V = Cste = 1013hPa \cdot 32cm^3$. Les valeurs fournies par la modification du canal $f := 1013 * 32/V$, que vous réglez sur p , pouvez-vous la comparer à la tension U_2 en lisant les valeurs avec l'outil “Survey” (ou en utilisant “Measurement” > “Channel manager” en mettant les valeurs U_2 sur l'axe des x et les valeurs de pression sur l'axe des y , la pente du diagramme $p=f(U_2)$ donne le facteur de calibration). Votre facteur d'étalonnage sera de quelques centaines de hPa (ou mbar) par Volt et U_2 lira quelque chose autour de 2,5 Volt à la pression ambiante, par exemple, la modification du canal approprié peut ressembler à ceci $f := 1013 + (U_2 - 2,25) * 235$ où vous mettez la lecture réelle de U_2 à la pression ambiante au lieu de 2,25 et votre facteur de calibrage réel au lieu de 235.
- Pour visualiser le diagramme pV , démarrez le brûleur, notez l'heure, et après un certain temps de chauffe, vous pouvez démarrer le moteur en donnant un coup sur le volant. Commencez les mesures toujours après que la fréquence de rotation et les deux valeurs de température se soient stabilisées. Sélectionnez le tableau “Mesure rapide” et utilisez des réglages comme ceux de la figure suivant :

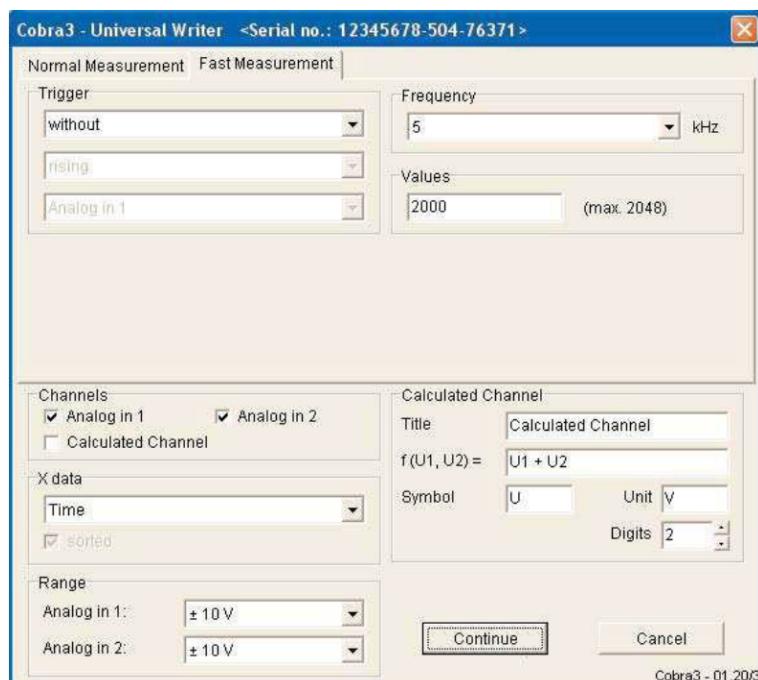


Figure 3.5 – Paramètres de mesure

- Après, vous pouvez enregistrer une courbe en cliquant sur le bouton “Continuer”. Mettez à l'échelle les courbes de volume et de pression par “Analysis” > “Channel modification” avec vos formules réelles analogues à les formules précédentes ($f :=$). Enregistrez les courbes afin de disposer d'une sauvegarde pour la manipulation ultérieure des données.
Coupez les courbes de manière à ce qu'il ne reste qu'un seul cycle complet des courbes en utilisant l'outil de marquage (le symbole de la croix à côté de la loupe) et l'outil de coupe (symbole des ciseaux). Utilisez “Mesure” > “Gestionnaire de canaux” et mettez le volume en abscisse et la pression en ordonnée. Dans la fenêtre “Convert relationship to function” qui apparaît alors, sélectionnez “Keep measurement in relation mode”. Le bouton “Show integral” peut être utilisé pour évaluer la surface du cycle.

- En complétant tout ces étapes, vous allez obtenir les différentes valeurs des grandeurs physiques relative à ce moteur : pression, température, vitesse de rotation, ainsi, les graphes et le cycle Stirling réel.

3.2 Manipulations

3.2.1 Manip. 1 : Étude du dispositif de Stirling en mode récepteur

Dans un premier temps, on fera fonctionner le dispositif comme un récepteur. Pour cela, on apportera du travail mécanique au système à l'aide d'une source électrique. Brancher l'alimentation CC en respectant la polarité sur l'unité moteur/générateur et le relier au volant d'inertie à l'aide de la courroie. Régler la tension afin que le moteur tourne à une vitesse fixe. Avant de démarrer le moteur électrique, on notera les températures T1 et T2 sur l'unité $pVnT$.

1. Visualiser sur le logiciel Cobra3 la variation du pression et de volume en fonction du temps.
2. Faire une acquisition du cycle pV et puis déterminer l'aire. En déduire l'énergie totale du cycle récepteur.
3. En utilisant la vitesse de rotation du moteur (valeur obtenue sur l'unité de mesure), déterminer la puissance thermodynamique du dispositif. La comparer à la puissance consommée.
4. Faire à nouveau une mesure de la températures T1 et T2 et conclure sur cette machine thermique. Que se passe-t-il lorsque l'on inverse les bornes du moteur électrique ?

3.2.2 Manip. 2 : Étude du dispositif de Stirling en mode moteur

Remplir le brûleur par l'alcool et noter le volume utilisé. Allumer la mèche et déclencher le chronomètre. Placer le brûleur au niveau de la chambre chaude, lorsque la source chaude atteint 80 °C environ, donner une légère impulsion, dans le sens des aiguilles d'une montre, au volant d'inertie afin de le faire démarrer. Il doit atteindre assez rapidement un régime stable d'environ 600 tours par minute.

5. Estimer la puissance thermique du brûleur.
6. Visualiser les variations $p(t)$ et $V(t)$ et faire apparaître le cycle pV . Puis mesurer l'aire du cycle et en déduire l'énergie totale.

Mesure avec le couple de torsion : Placer le torsiomètre. La friction doit être ajustée progressivement et délicatement à l'aide de la vis prévue à cet effet. Le pointeur ne doit pas osciller. Faites plusieurs cycles successifs pour plusieurs valeurs de couples de torsion C en notant toutes les grandeurs précédentes.

7. Pour chaque valeur C de couple, déterminer les quantités d'énergie suivantes : W_m le travail mécanique effectué par le couple appliqué, W_{pV} l'énergie mécanique totale fournie durant un cycle, déterminée à l'aide du logiciel, et W_{fr} l'énergie de friction consommée par le frein, ainsi que la puissance mécanique P_m .
8. Tracer les quantités W_m , W_{pV} et W_{fr} en fonction de n ainsi que la puissance P_m en fonction de n.

9. Déterminer le rendement mécanique, le rendement totale et le rendement théorique de Carnot. Interpréter les résultats ?

Mise en place d'une charge(Lampe à incandescence) : L'unité moteur/générateur joue le rôle d'un générateur électrique débitant dans une lampe à incandescence. Le générateur est couplé au volant du moteur à l'aide d'une courroie.

10. A l'aide d'un wattmètre, mesurer la puissance électrique P_e délivrée dans la lampe par le générateur.
11. Reporter sur un graphique, les valeurs des puissances P_e déduites des mesures, ainsi que la puissance mécanique effective P_m délivrée par le moteur en fonction de la vitesse de rotation du moteur. P_m est obtenus des résultats précédent du couple de torsion.
12. Pourquoi $P_m \neq P_e$? Calculer le rendement électrique.

3.2.3 Manip. 3 : Étude du dispositif de Stirling couplé à un concentrateur parabolique

Cette manipulation peut également être réalisée avec l'aide du soleil comme source de chaleur, il faut donc disposer des accessoires nécessaires au fonctionnement du moteur solaire (une base de support / une tige d'acier avec des accouplements à charnière / une parabole lequel est couplée le moteur Stirling) comme le montre la figure 3.6.



Figure 3.6 – Moteur Stirling avec les accessoires solaires

Vous pouvez exposer la parabole aux radiations du soleil ou bien l'exposer aux radiations des lampes très puissantes qui servent comme simulateurs solaires, il faut ajuster l'inclinaison de la parabole à l'aide des charnières pour profiter du maximum d'irradiation. Lier le moteur aux appareils des mesures et faire les tâches suivantes :

13. Estimer la puissance des irradiations.
14. Visualiser $p(t)$ et $V(t)$ et faire apparaître le cycle pV . Puis mesurer l'énergie totale et déduire le rendement pratique. Que pouvez-vous en déduire ?

3.3 Résultats

1. Par l'aide de l'unité Cobra3, on obtient les graphes de pression et de volume en fonction de temps, et on peut remarquer qu'ils sont de forme sinusoïdal, l'augmentation de la pression correspond à la diminution du volume et vice versa :

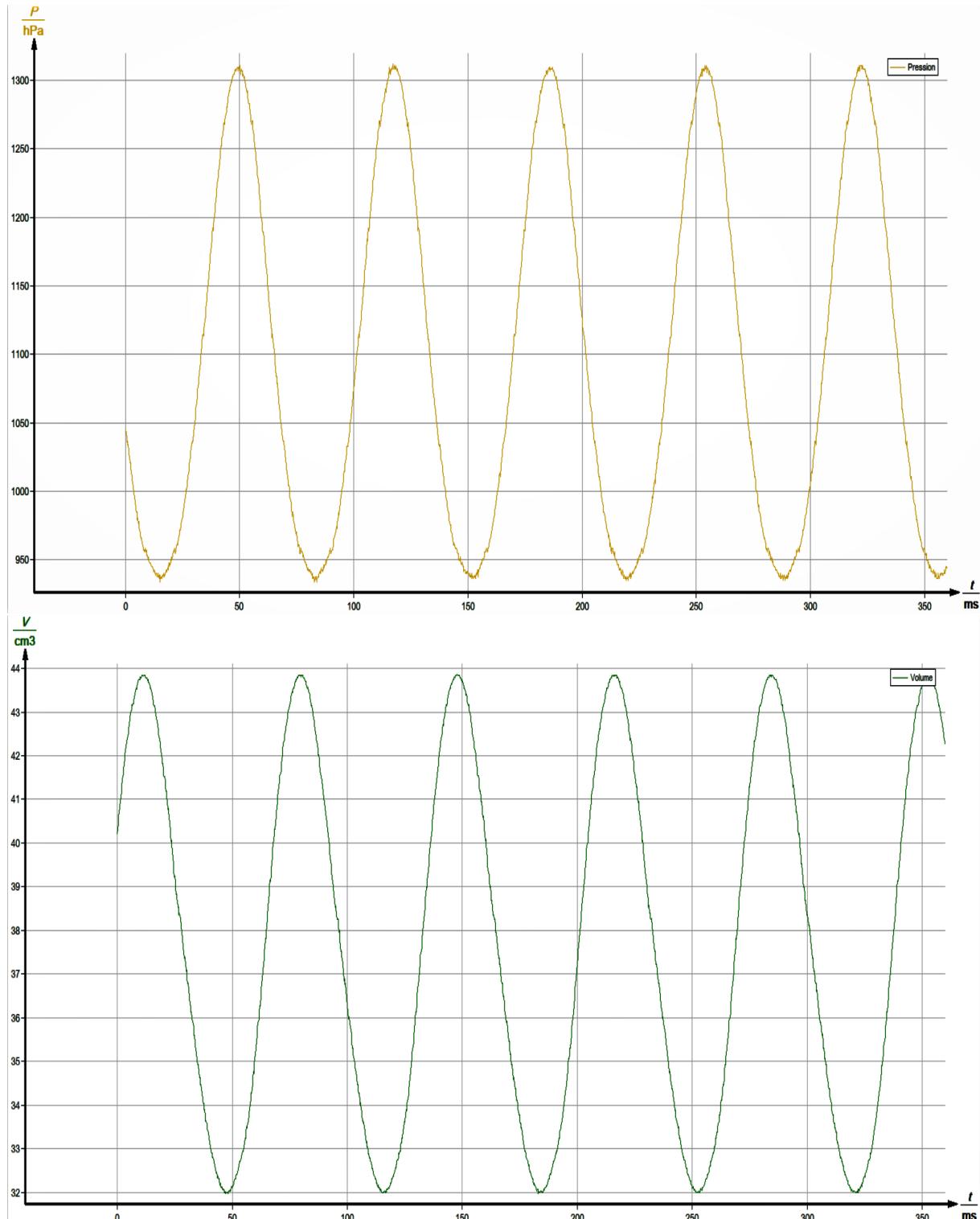


Figure 3.7 – $p(t)$ et $V(t)$ du cycle récepteur

2. On visualise les deux grandeurs l'un par rapport de l'autre, la pression en fonction du volume pour une seule période, on obtient donc le cycle pV :

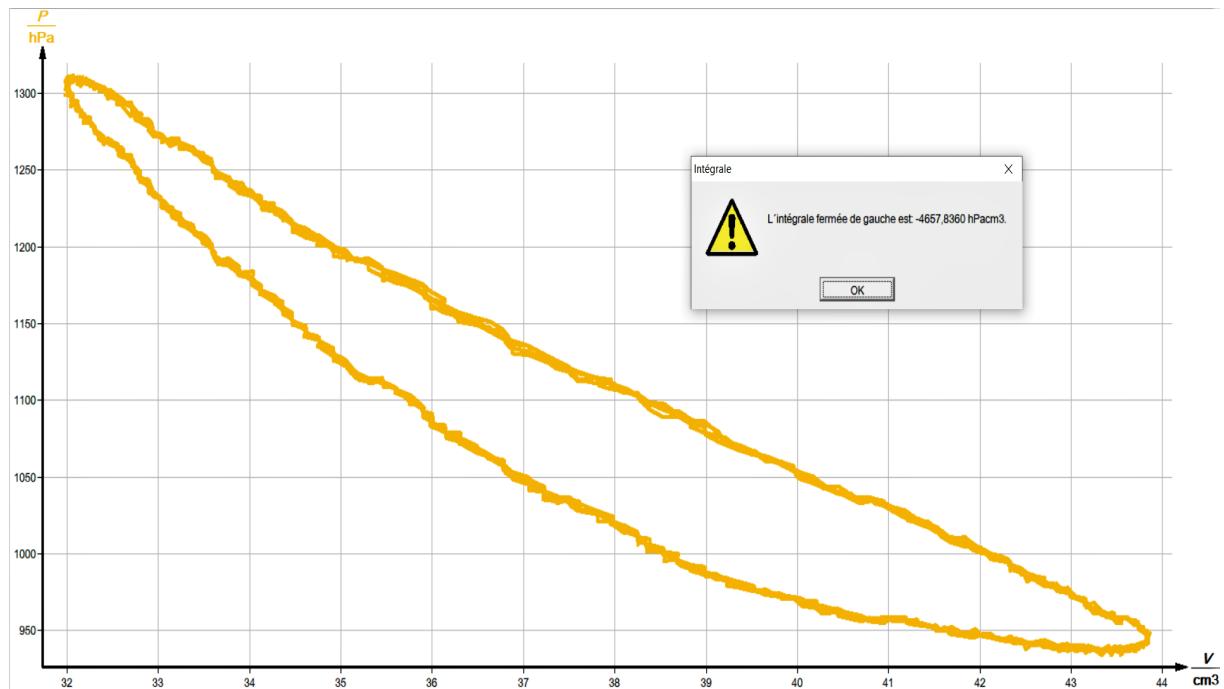


Figure 3.8 – Cycle Stirling réel en mode récepteur

⇒ L'énergie totale du cycle récepteur : $W_{pV-rec} = 4658.100.10^{-6} = 465.8mJ$

3. On a réglé le courant et la tension de l'alimentation aux valeurs : $I = 1.2A$; $U = 12V$, nous avons visualisé sur l'unité de mesure : $n = 852tr/min$, donc :

- La puissance thermodynamique : $P_{therm} = W_{pV-rec} \times n/60 = 6.62W$
- La puissance électrique consommée : $P_e = U.I = 9.6W$

⇒ On remarque que : $P_{therm} < P_e$, cela est dû aux pertes par friction au niveau du courroie et les pertes thermiques.

4. Initialement : $T_1 = 28^\circ\text{C}$; $T_2 = 28.9^\circ\text{C}$

A la fin de la manipulation : $T_1 = 25^\circ\text{C}$; $T_2 = 30.8^\circ\text{C}$

⇒ Le moteur se comporte comme une pompe à chaleur, il soutire les calories présentes dans l'échangeur froid et dans le milieu extérieur et les transmet vers l'échangeur chaud. En raison d'efficacité du moteur , le processus est lent.

⇒ Lorsqu'on inverse les connexions des bornes du moteur par rapport à l'alimentation, le sens de rotation du moteur change et par la suite les sources chaud et froid vont s'inverser, l'échangeur chaud va devenir froid et vice versa.

5. La puissance thermique du brûleur :

- Le volume d'alcool brûlé : $\Delta V = 4ml$
- La durée de combustion : $\Delta t = 8min$
- La masse volumique d'alcool : $\rho = 0.83g/ml$
- Le pouvoir calorifique d'alcool : $c = 25000J/g$

⇒ La puissance thermique du brûleur est exprimée par la relation :

$$P_{th} = \frac{\rho.c.\Delta V}{\Delta t} = 172W$$

6. Les graphes de la pression et le volume en fonction du temps, ainsi le cycle pV en mode moteur :

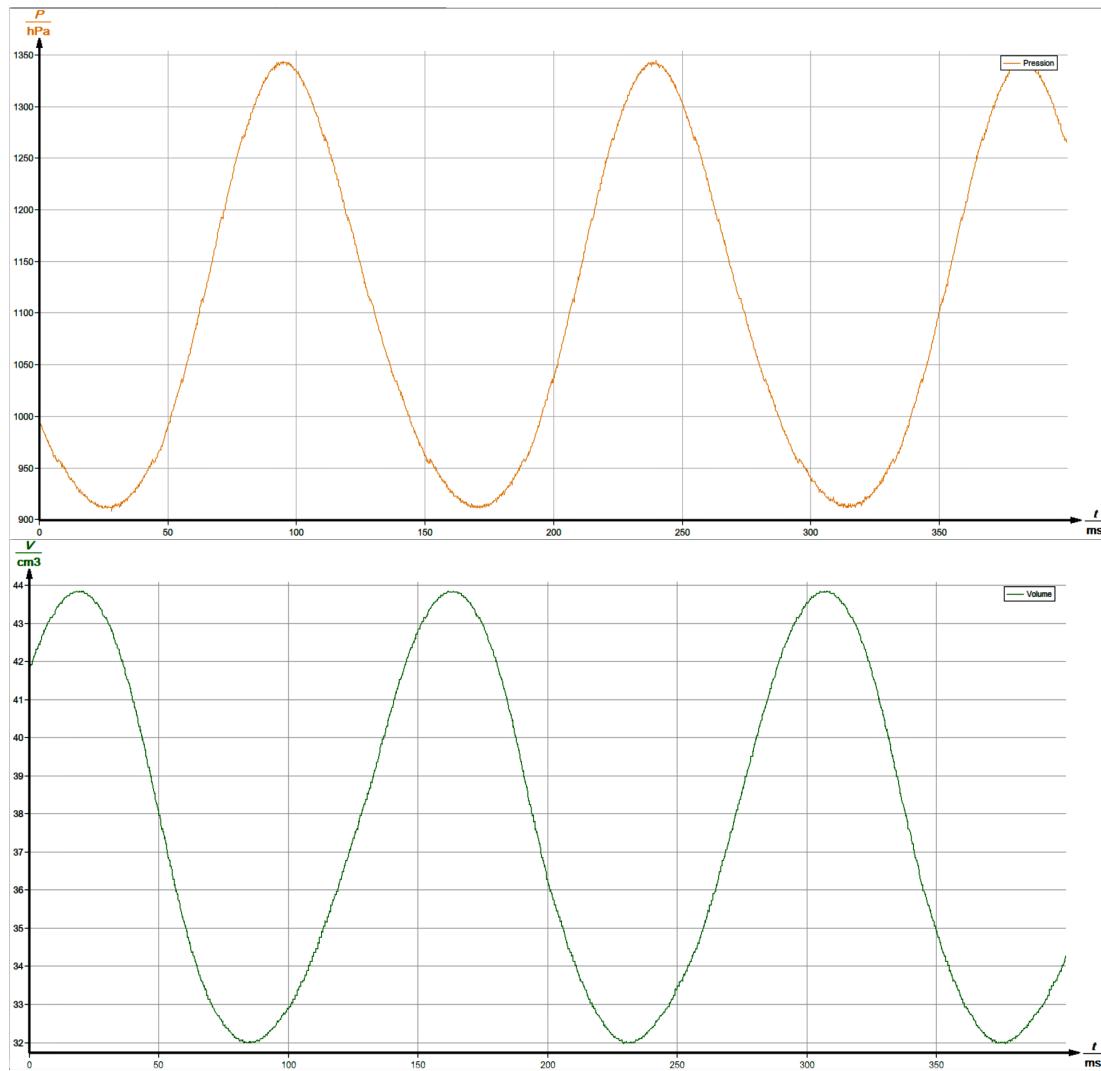


Figure 3.9 – $p(t)$ et $V(t)$ du cycle moteur

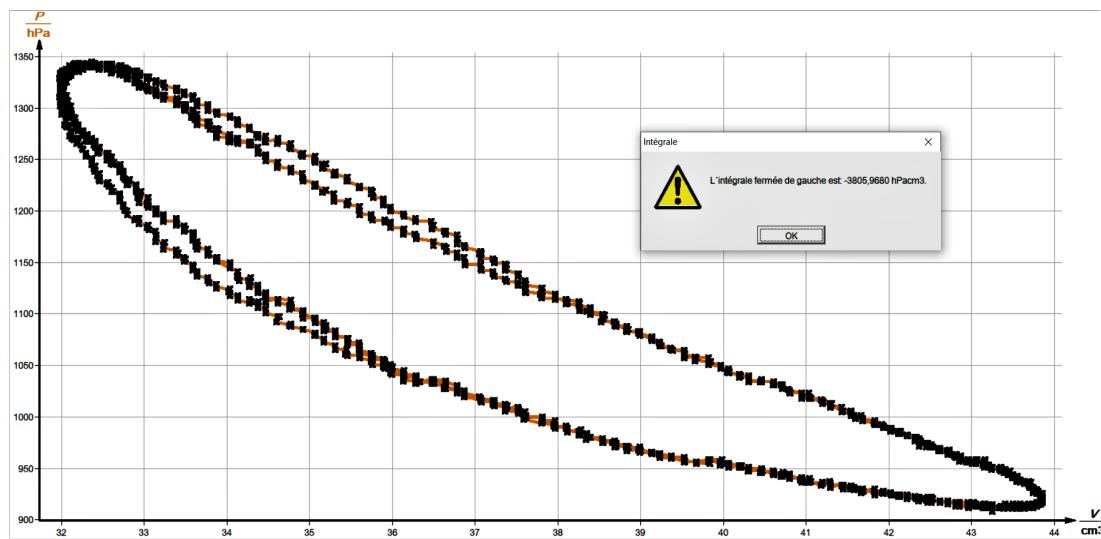


Figure 3.10 – Cycle Stirling réel en mode moteur

⇒ L'énergie totale du cycle récepteur : $W_{pV-mot} = 3806.100.10^{-6} = 380.6mJ$

7. On a choisi 8 valeurs du couple C, pour déterminer :

- W_m le travail mécanique effectué : $W_m = 2\pi \cdot C$
- P_m la puissance mécanique : $P_m = W_m \cdot f$ avec f la fréquence $f = n/60$
- W_{fr} l'énergie de friction : $W_{fr} = W_{pV} - W_m$

C(10^{-3}N.m)	n(tr/min)	f(Hz)	$W_m(\text{mJ})$	$P_m(\text{mW})$	$W_{pV}(\text{mJ})$	$W_{fr}(\text{mJ})$
22.8	271	4.52	143	646	240	97
22.1	355	5.92	139	823	249	110
20.2	487	8.12	127	1031	247	120
19.1	550	9.17	120	1100	245	125
15.6	643	10.72	98	1051	234	136
13.4	700	11.67	84	980	227	143
8.4	791	13.18	53	699	216	163
7.2	811	13.52	45	608	212	167

Table 3.2 – Les valeurs des W_m, P_m, W_{pV}, W_{fr} suivant le couple

8.

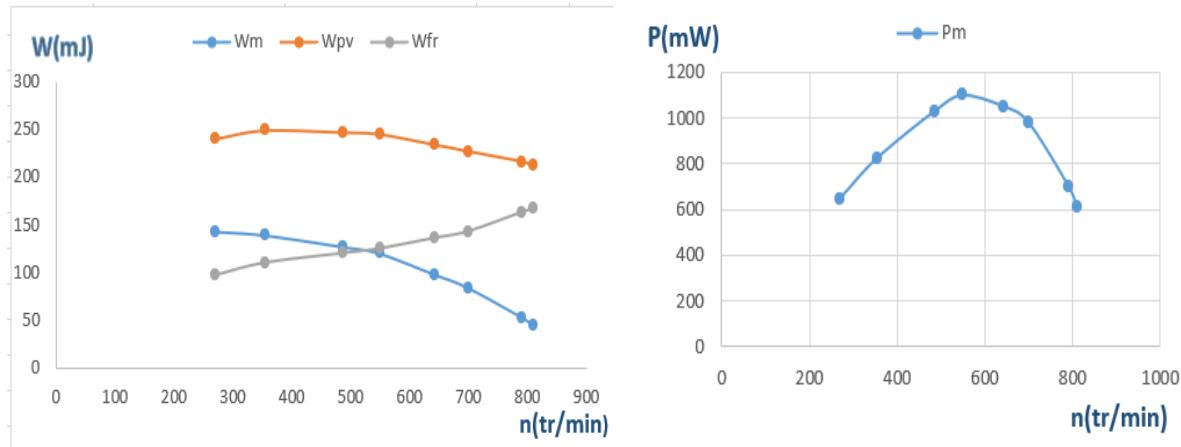


Figure 3.11 – Les graphes de W_m, W_{pV}, W_{fr} et P_m tracés par Excel

9. Pour déterminer le rendement, on prend une mesure dans la plage de puissance maximale :

$P_m(\text{mW})$	$C(10^{-3}\text{N.m})$	n(tr/min)	f(Hz)	T1($^{\circ}\text{C}$)	T2($^{\circ}\text{C}$)	$W_m(\text{mJ})$	$W_{pV}(\text{mJ})$
1100	19.1	550	9.17	183	72.9	120	245

Table 3.3 – Le point de la puissance maximale

- Le rendement théorique de Carnot (il faut convertir la température en K) :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 24.14\%$$

- Le rendement totale :

$$W_{th} = \frac{P_{th}}{f} = \frac{172}{9.17} = 18.75\text{J}$$

$$\eta = \frac{W_m}{W_{th}} = 0.64\%$$

- Le rendement mécanique :

$$\eta_{mec} = \frac{W_m}{W_{pV}} = 48\%$$

⇒ Le dispositif Stirling développe un rendement très faible par rapport au rendement théorique du Carnot, car le processus de Stirling idéalisé suit des lignes isochores et isothermes, par contre le processus de Stirling réel peut s'en écarter considérablement et ce pour ces raisons : le déphasage des pistons, la vitesse élevée du gaz, les pertes par frottement et le régénérateur ne fonctionne pas à 100% d'efficacité.

10. Pour huit valeurs de la vitesse de rotation du moteur, on a enlevé les valeurs de la puissance électrique par un wattmètre :

n(tr/min)	271	355	487	550	643	700	791	811
P_e (mW)	73	209	338	360	345	302	119	70

Table 3.4 – Les valeurs de la puissance électrique P_e délivrée dans la lampe

11.

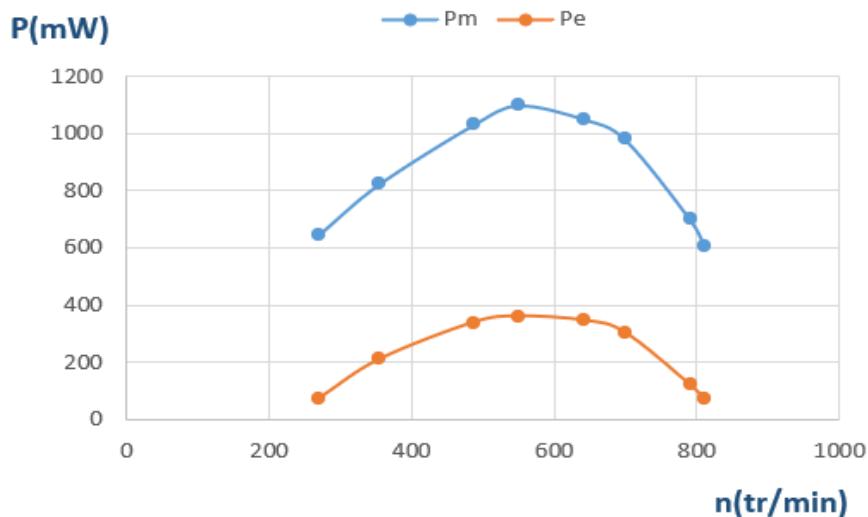


Figure 3.12 – P_e et P_m en fonction de n tracés par Excel

12. La puissance électrique est toujours inférieure de la puissance mécanique, cela est dû au frottement au niveau de la liaison mécanique (volant/courroie/poulie).

Pour calculer le rendement électrique, on prend des mesures dans la plage maximales de puissance :

C(10^{-3} N.m)	n(tr/min)	P_e (mW)	P_m (mW)
19.1	550	360	1100

Table 3.5 – Les puissances maximales pour calculer le rendement électrique

⇒ Le rendement électrique :

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_m} = 32\%$$

3.4 Discussions

Dans cette partie, nous présentons des conclusions sur cette phase pratique, en outre les problèmes que nous avons rencontrés durant la réalisation :

☞ D'après les manipulations réalisées, nous pouvons sortir avec trois remarques principales :

- Le cycle Stirling obtenu par les mesures expérimentales est totalement différent du cycle théorique idéalisé, le cycle pratique réel est une courbe fermée avec une forme proche de la forme de l'ellipse, où on trouve une coïncidence entre les processus isochores et les processus isothermes d'un cycle théorique, on peut expliquer cela par la vitesse trop élevée du gaz de travail, lors des différents positionnements des deux pistons, et le volume mort entre les échangeurs chaud et froid.
- Le rendement théorique d'un moteur Stirling est particulièrement remarquable, par contre le rendement obtenu dans cette manipulation par les mesures pratiques est limité en raison des déperditions thermiques et les frictions mécaniques.
- On peut dire aussi que le moteur Stirling est une formidable machine thermique, d'un côté, il est possible d'utiliser presque toutes les sources de chaleur pour l'entraîner, et d'un autre côté, la réversibilité de son processus thermodynamique, si un travail mécanique est fourni au moteur, celui-ci peut fonctionner comme une pompe à chaleur capable de refroidir selon le sens d'entraînement.

☞ On peut également visualiser le cycle Stirling par la voie d'un oscilloscope, en cas de manque de l'unité Cobra3.

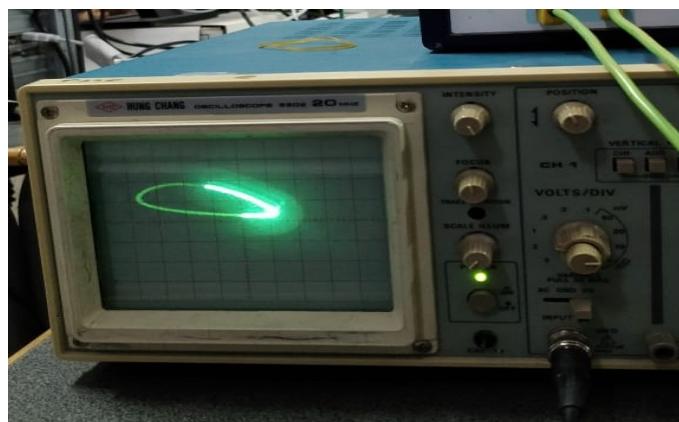


Figure 3.13 – Cycle Stirling réel visualisé par l'interface de l'oscilloscope

☞ **Les difficultés rencontrées :** nous n'avons pas pu réaliser la troisième manipulation, car le moteur Stirling couplé aux accessoires solaires est endommagé, c'est pour cela que nous n'avons pas répondu aux questions 13 et 14.

Conclusion générale

Au moment où l'énergie représente un enjeu majeur, de nouvelles voies sont découvertes pour la produire. Dans cette optique, et pour l'associer au concept de production renouvelable et autonome, la centrale solaire à concentration *Parabole/Stirling* présente des atouts considérables.

Ce travail concerne l'étude théorique et pratique du moteur Stirling. Dans un premier temps, une étude bibliographique complet nous a permis de présenter des généralités sur le moteur, historique, principe de fonctionnement, types et classification, domaines d'application, nous avons aussi effectué une description détaillée sur le système Parabole/Stirling ou on a évoqué les principes physiques qui régissent ce système (l'optique de la parabole, les transferts thermiques au niveau de récepteur, le cycle Stirling et le rendement théorique du moteur).

Le second volet de notre étude réside dans la réalisation d'un travail pratique sur un prototype réservé au **TP**, et avec les accessoires de mesure attachés avec lui, nous ont permis de prendre des mesures et mieux comprendre les cycles thermodynamiques et le détail de fonctionnement de ce moteur.

En bref, le moteur Stirling est une grande curiosité thermodynamique qui attire de nombreux passionnés et représente un formidable outil pédagogique, néanmoins à l'échelle technique, quelques défis ont empêché le succès total du moteur, notamment le coût de fabrication, la densité de puissance limitée et les valeurs d'efficacité qui n'atteignent pas le potentiel théorique.

Bibliographie

- [1] RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2022/IRENA
<https://www.irena.org/>
- [2] GLOBAL ELECTRICITY REVIEW 2022/EMBER
<https://ember-climate.org/>
- [3] Ministère de la transition énergétique et du développement durable
<https://www.mem.gov.ma/>
- [4] Cours Réglementation énergétique au Maroc, Pr. Ahachad Mohammed.
- [5] Moroccan Agency for Sustainable Energy
<https://www.masen.ma/>
- [6] Syndicat des énergies renouvelables - Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/>
- [7] The Stirling Engine history : <http://hotaireengines.org/>
- [8] Theodor Finkelstein and Allan J Organ, Air Engine (2001),page 23.
- [9] Stirling Types : http://stirlingshop.com/html/stirlingengines_types.html
- [10] Ramla GHEITH, Étude expérimentale et théorique des moteurs Stirling à apport de chaleur externe, Thèse de Doctorat, Université de NANTES, France (2011).
- [11] M. Bensafi, S. Zegnoun, Etude expérimentale et modélisation d'un concentrateur parabolique solaire, Journal of Scientific Research, Université de Béchar, Algérie (2013).
- [12] H. Kadraoui, Etude comparative et rendements énergétiques des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamiques de l'énergie solaire, Mémoire de Magister, Université Abou-bekr Belkaid Tlemcen, Algérie (2011).
- [13] Alexis CHATENET, LA CENTRALE DISH-STIRLING-Etude technique et énergétique, et mise en place d'un projet pédagogique, Mémoire de Magister, ESPE Académie de Limoges, France (2015).
- [14] Experiment LEP3.6.04-15 Stirling Engine with Cobra3 ; www.phywe.com