

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Azizi Amine**

**Sahraoui Younes**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : GENIE MECANIQUE

Option : Energétique

**Thème :**

**Etude et dimensionnement du moteur Stirling**

**Devant le jury composé de :**

Dahmane	.....	UAMOB	Président
Bouragbi.L	.....	UAMOB	Encadreur
Baghdadi	.....	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2020/2021

## *Dédicace*

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

Amine

## *Dédicace*

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

Younes

## Remerciements

*En préambule, nous souhaitons rendre grâce à Dieu, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail*

*Nous tenons évidemment à débiter ces remerciements en témoignant de nos profondes reconnaissances envers Monsieur **Lakhdar BOURAGBI**, maître de conférences à l'Université BOUIRA pour nous avoir encadré et dirigé ce travail avec patience.*

*Nous remercions vivement Monsieur **DAHMANE** Maître de conférences à l'Université BOUIRA, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi que pour sa contribution à ma formation.*

*Je veux exprimer mes remerciements aux membres de jury,  
Madame **BAGHDADI** à l'Université BOUIRA*

*Nos remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université BOUIRA.*

## ملخص

تعتمد المحركات ذات الاحتراق الداخلي والخارجي على مصادر الوقود الاحفوري (بتروول، فحم، غاز) الأيلة للزوال والنفاد، والمسببة للتغير المناخي الحاصل بسبب الاحتباس الحراري. فإن التحدي الحالي هو إيجاد مصادر بديلة لهذه المحركات مثل محرك ستيرلينغ.

تعرض هذه المذكرة محركات ستيرلينغ الفا وجاما وبيتا التي ابتكرها روبرت ستيرلينغ عام 1816، أي قبل محركات الاحتراق الداخلي. يقدم أيضاً دراسة ديناميكية حرارية لمحرك جاما الذي تم اختياره وتصميمه بواسطة برنامج SOLIDWORKS، والذي أظهرت نتائجه التي تم الحصول عليها من أدائه الجيد وخصائصه أن هذا المحرك هو احد الحلول الرئيسية فالمستقبل.

## **Résumé**

Les moteurs à combustion interne et externe reposent sur des sources de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) qui sont à la fois combustibles fossiles et sources de gaz à effet de serre. La difficulté consiste à trouver d'autres sources pour ces moteurs, comme le moteur Stirling.

La présente note présente les moteurs Stirling alpha, gamma et bêta développés par Robert Stirling en 1816, c'est-à-dire avant les moteurs à combustion interne. Il présente également une étude thermodynamique du moteur gamma sélectionné et conçu par SOLIDWORKS, dont les résultats, obtenus à partir de ses bonnes performances et de ses caractéristiques, montre que ce moteur est l'une des solutions clés pour l'avenir.

## **Abstract**

Internal and external combustion engines depend on the sources of fossil fuels (oil, coal, gas) which are perishable and cause the climate change that is caused by global warming. the current challenge is to find alternative sources for these motors, such as the Stirling engine.

The memo presents the Sterling Alpha, Gamma, and Beta engines invented by Robert Stirling in 1816, prior to internal combustion engines. It also provides a thermodynamic study of a gamma engine selected and designed by SOLIDWORKS, whose results obtained from its good performance and features show that this engine is one of the key solutions for the future.

## Table des matières

Introduction générale .....	2
CHAPITRE I : Généralités sur moteur Stirling .....	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique .....	6
•L’Histoire de Robert Stirling .....	6
•L’Histoire du moteur Stirling .....	7
I.3. Le fonctionnement du moteur Stirling.....	9
I.3.1. Les quatre phases élémentaires .....	10
I.3.2. Le rôle de déplaceur .....	13
I.4. Les types du Moteur Stirling .....	15
I.4.1. Moteur Configuration Alpha.....	15
I.4.2. Moteur Configuration Beta .....	16
I.4.3. Moteur Configuration Gamma .....	17
I.5. Application des moteur stirling .....	18
I.5.1. Conversion de l’énergie solaire en électricité .....	18
I.5.2. Domaine militaire .....	19
I.5.3. Domaine spatiale.....	20
I.5.4. Domaine de l’informatique .....	21
I.5.5. Domaine de cogénération.....	22
I.5.6. Domaine du transport : Voiture hybride .....	22
I.5.7. Domaine industriel .....	23
I.7. Les avantages et les inconvénients de moteur Stirling.....	24
I.7.1. Les avantages .....	24
I.7.2. Les inconvénients.....	25
I.8. Conclusion.....	26
CHAPITRE II : Etude thermodynamique de moteur Stirling .....	28
II.1. Introduction .....	29
II.2. Choix du type de moteur .....	29
II.3. Principe de fonctionnement du modèle a étudié .....	30
II.4. Cycle thermodynamique de moteur Stirling théorique.....	34
II.4.1. Etude thermodynamique .....	35
II.4.2. Les formules thermodynamiques utilisées pour les calculs.....	35
II.4.2.1. Les volumes .....	36

II.4.2.2. Les pressions :	37
II.4.2.3. Les chaleurs :	38
II.4.2.4. Les travaux :	40
II.4.2.5. Le rendement	40
II.5. Etude et dimensionnement	41
II.5.1. Définitions des démentions	42
II.5.2. Dimension et paramètre de calcul	43
II.5.3. Calcul théorique du cycle de Stirling de la configuration proposée	44
II.6. Conclusion	55
CHAPITRE III : Conception de moteur Stirling avec SOLIDWORKS	:56
III.1. Introduction	57
III.2. Présentation du logiciel SOLIDWORKS	57
III.2.1. Menu principal	57
III.2.2. Principe général	58
III.3. Présentation des différentes pièces de moteur Stirling	60
III.3.1. Plaque inférieure du grand cylindre	62
III.3.2. La plaque supérieure de grand cylindre	62
III.3.3. Grand cylindre	63
III.3.4. Déplaceur	63
III.3.5. Tige du déplaceur	64
III.3.6. Petit cylindre (Cylindre de travail)	65
III.3.7. Piston	65
III.3.8. Tige de piston	66
III.3.9. Le chapeau	66
III.3.10. Les bielles	67
III.3.11. Le support du vilebrequin	67
III.3.12. Vilebrequin	68
III.3.13. Volant d'inertie	68
III.3.14. Boulons	69
III.4. Tableau des pièces	70
III.5. Assemblage des composants	70
III.6. Conclusion	71
Conclusion générale	72
Bibliographie	73

**ANNEXES ..... 76**

### **Listes des Tableaux**

**Tableau N°1 : Paramètres géométriques et thermiques .....43**

**Tableau N°2 : Tableau récapitulatif des volumes .....47**

**Tableau N°3 : Tableau récapitulatif des pressions, volumes et températures .....49**

**Tableau N°4 : Tableau récapitulatif des paramètres caractéristique des évolutions du cycle ....54**

**Tableau N°5. Tableau des pièces .....70**

## Listes des figures

<i>Figure I.1 : Robert Stirling (25 octobre 1790 - 6 juin 1878)</i> .....	6
<i>Figure I.2 : L'une des premières réalisations de moteur Stirling</i> .....	7
<i>Figure I.3 : Groupe électrogène à moteur Stirling de 180 W développé par Philips dans les années 1950</i> ... ..	8
<i>Figure I.4 : Schéma simple du moteur Stirling avec un régénérateur</i> .....	10
<i>Figure I.5: Phase de chauffage</i> .....	11
<i>Figure I.6: Phase de détente</i> .....	11
<i>Figure I.7: Phase de refroidissement</i> .....	12
<i>Figure I.8 : Phase de compression</i> .....	12
<i>Figure I.9 : 1<sup>ère</sup> phase de travail du déplaceur</i> .....	13
<i>Figure I.10 : 2<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur</i> .....	13
<i>Figure I.11 : 3<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur</i> .....	14
<i>Figure I.12 : 4<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur</i> .....	14
<i>Figure I.13: Schéma du moteur type ALPHA</i> .....	15
<i>Figure I.14: Schéma du moteur type BETA</i> .....	16
<i>Figure I.15: Moteur type gamma</i> .....	17
<i>Figure I.16: Schéma du moteur type GAMMA</i> .....	18
<i>Figure I.17 : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish (Nepven et al. 2006)</i> .....	19
<i>Figure I.18 : Stirling solaire devant le Pentagone en juin 1998</i> .....	20
<i>Figure I.19 : Micro-processeur refroidi par moteur Stirling le ventilateur de MSI</i> .....	21
<i>Figure I.20: Chaudière à bois Stirling (Stirling power model)</i> .....	22
<i>Figure I.21: Moteur Stirling d'une voiture hybride</i> .....	23
<i>Figure I.22: Moteur Stirling type STM 4-120 (Boucher, 2002)</i> .....	24
<i>Figure II.1 : Représentations des deux variantes du moteur Stirling modèle Gamma</i> .....	30
<i>Figure II.2: Moteur Stirling de type gamma</i> .....	31
<i>Figure II.3 : Compression isotherme</i> .....	31
<i>Figure II.4 : Echauffement isochore</i> .....	32

<b>Figure II.5 : Détente isotherme .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.6 : Refroidissement isochore .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.7 : Diagramme d'un moteur Stirling théorique .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.8 : Schémas représentatif de la dimension principale pour l'étude thermodynamique d'un moteur Stirling type Gamma .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.9 : L'influence de <math>T_c</math> sur le rendement théorique .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure II.10 : L'influence de <math>T_f</math> sur le rendement théorique .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure II.11 : L'influence de <math>T_f</math> sur le rendement théorique .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III.1 : Menu principal de SolidWorks .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.2 : Barre d'outils fonctions .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.3 : Arbre de création de la pièce .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.4 : Exemple d'une esquisse .....</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.5: Moteur Stirling d'un type Gamma <math>\gamma</math> .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.6 : Plaque inferieur de moteur Stirling .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure III.7 : Plaque supérieure de grand cylindre .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure III.8 : Grand cylindre .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure III.9 : Déplaceur .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.10 : Tige de déplaceur .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.11 : Petit cylindre .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.12 : Piston .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.13 : Tige de piston .....</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.14: Chapeau .....</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.15 : Les bielles .....</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.16 : Support .....</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.17 : Vilebrequin .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure III.18 : Volant d'inertie .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure III.19 : Boulons .....</b>	<b>69</b>

## *Nomenclature*

<b>Symboles</b>	<b>Significations</b>	<b>Unité</b>
<b>P</b>	Pression	[Pa]
<b>V</b>	Volume	[m <sup>3</sup> ]
<b>n</b>	Nombre de mole	[mole]
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits	[J/mole. K]
<b>r</b>	Constante des gaz parfaits	[J/Kg. K]
<b>T</b>	Température	[°C], [K]
<b>D<sub>cyl</sub></b>	Diamètre intérieur du cylindre du déplaceur	[m]
<b>D<sub>d</sub></b>	Diamètre de déplaceur	[m]
<b>D<sub>td</sub></b>	Diamètre de la tige du déplaceur	[m]
<b>D<sub>pc</sub></b>	Diamètre du cylindre du piston de travail	[m]
<b>h<sub>cyl</sub></b>	Hauteur du cylindre du déplaceur	[m]
<b>h<sub>d</sub></b>	Hauteur du déplaceur	[m]
<b>h<sub>pc</sub></b>	Hauteur du cylindre du piston	[m]
<b>T<sub>c</sub></b>	Température de la source chaude	[°C], [K]
<b>T<sub>f</sub></b>	Température de la source froide	[°C], [K]
<b>V<sub>d</sub></b>	Volume de déplaceur	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>gc</sub></b>	Volume de grand cylindre sans déplaceur	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>min</sub></b>	Volume de l'air emprisonné dans le grand cylindre	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>td</sub></b>	Volume de la tige du déplaceur	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>pc</sub></b>	Volume du cylindre du piston de travail	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>max</sub></b>	Volume maximal	[m <sup>3</sup> ]
<b>m<sub>air</sub></b>	Masse de l'air	[Kg]
<b>ρ<sub>air</sub></b>	Masse volumique de l'air	[Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Q</b>	Quantité de chaleur	[J]
<b>W</b>	Travail	[J]
<b>η</b>	Rendement	

## **Acronymes**

CAO : Conception assistée par ordinateur

NASA : National Aeronautics and Space Administration

SRG : La Société suisse de Radiodiffusion et télévision est le Groupe audiovisuel public de la Suisse

mW : milliwatt

MW : Mégawatt

PMH : Point Mort Haut

MPB : Point Mort Bas

2D : Deux Dimensions

3D : Trois Dimensions

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

# INTRODUCTION GENERALE

---

## **Introduction générale**

Afin de développer la technologie de production d'énergie, des recherches sur de nouvelles sources d'énergie ont été menées. Elles doivent préserver à la fois l'environnement et les combustibles fossiles. C'est une alternative de préfiguration.

Le moteur Stirling est un moteur thermique qui utilise un gaz en circuit fermé pour fonctionner. Dans la plupart des versions actuelles de ce moteur, le gaz n'est rien d'autre que de l'air. Le principe de fonctionnement du moteur Stirling est suffisant mais son efficacité peut dépasser 40% ce qui est bon pour convertir la chaleur en travail.

L'efficacité des systèmes énergétiques peut améliorer en passant par deux voies. La première voie s'intéresse au moteur à combustion interne pour des plusieurs applications où une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur qui est dissipé dans l'atmosphère. La deuxième s'intéresse au moteur à apport de chaleur comme le moteur Stirling qui utilise la chaleur comme une source d'énergie primaire.

L'ingénieur Robert Stirling découvre le moteur Stirling en 1816 comme une solution pour remplacer les moteurs à combustion interne source de bruit et de pollution. Le moteur Stirling fonctionne selon un cycle fermé en utilisons un gaz (air) chauffé par une source de chaleur extérieure. Il présente plusieurs avantages : moins de bruit (à cause de l'absence d'échappement et de soupapes), la diversité de sources de chaleur...etc.

L'étude que nous avons menée durant ce travail a pour objectif de faire connaître le moteur Stirling. Nous allons détailler le principe de fonctionnement, les différents types de moteurs Stirling, les domaines d'application, les avantages et les inconvénients ainsi que l'expression de son rendement théorique.

Ce projet se terminera par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons les principaux résultats obtenus à l'issue de cette étude. Enfin, nous allons suggérer des perspectives pour la suite du présent travail.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Pour cela, notre travail est structuré comme suit :

- Le premier chapitre de ce mémoire décrit l’historique du moteur Stirling, leur différents types, leur domaine d’application, leur avantages et inconvénients.
- Le deuxième chapitre concerne l’étude thermodynamique, les données de bases de calcul, le dimensionnement géométrique du modèle choisi et l’élaboration des paramètres caractéristique de fonctionnement de ce moteur.
- Le troisième chapitre s’intéresse à la réalisation du modèle choisi du moteur Stirling en utilisons le logiciel de CAO SolidWorks, la sélection de la matière de fabrication des pièces, l’essai et la mise en œuvre.

# CHAPITRE I

## Généralités sur moteur Stirling

## I.1. Introduction

Le moteur Stirling est un moteur révolutionnaire non-polluant et économique. Thermiquement, il est plus efficace et il peut utiliser, pour son fonctionnement, n'importe quelle source de chaleur : gasoil, charbon, déchets végétales, énergie solaire, énergie nucléaire, etc. Dans ce chapitre, nous allons parler du moteur Stirling, son principe de fonctionnement et comment déterminer son efficacité thermique tant expérimentale que théorique.

La particularité du moteur Stirling comparé aux moteurs thermiques de voitures est que c'est un moteur dit à combustion externe ce qui implique qu'il peut fonctionner avec n'importe quelle source de chaleur ou de froid. On peut le faire fonctionner aussi bien avec des hydrocarbures, du bois, des biocarburants et même de l'azote liquide. Ce moteur est également parfaitement compatible avec un four solaire dont la source de chaleur à haute température est propice à l'obtention d'un bon rendement. C'est d'ailleurs en combinant un moteur Stirling avec un four solaire que l'on obtient les meilleurs rendements de conversion de rayonnement solaire en travail.

L'objectif de ce document est de vous aider à dimensionner puis fabriquer un moteur Stirling de type  $\gamma$ . Nous allons commencer par présenter le moteur Stirling en abordant son histoire, son principe de fonctionnement puis ses applications industrielles. Nous allons ensuite vous expliquer comment nous avons dimensionné notre moteur et quelles ont été les étapes de sa fabrication. Pour finir, nous commenterons les essais et analyserons les performances du moteur.

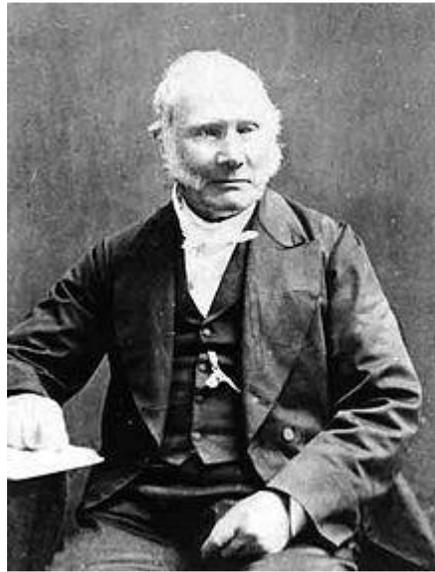
Les machines Stirling sont rangées en 2 catégories principales : les machines motrices et les machines réceptrices.

- ❖ Les moteurs, ou les machines motrices, absorbent de l'énergie thermique fournie par une source chaude et la convertissent en énergie mécanique.
- ❖ Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur (machine réceptrices) absorbent de l'énergie mécanique et la convertissent en énergie thermique dont une partie est absorbée au réservoir froid, tandis qu'une autre est rejetée au réservoir chaud.
- ❖ La troisième catégorie de machines Stirling correspond à celle des machines couplées, lesquelles utilisent 2 systèmes thermiques Stirling, l'un moteur, entraînant l'autre, récepteur.

Dans l'optique du développement durable, le moteur Stirling constitue une alternative à prendre en compte pour la conversion des énergies renouvelables en travail, avec un rendement théorique égal à celui de Carnot et une grande adaptabilité à des sources variées de chaleur (combustion, récupération, solaire) à haut ou bas niveau de température.

## I.2. Historique

- L'Histoire de Robert Stirling



*Figure I.1 : Robert Stirling (25 octobre 1790 - 6 juin 1878). [1]*

Le Pasteur Robert Stirling est né le 25 octobre 1790, à Glog in dans le comté de Perthshire en Ecosse. Il est mort le 6 juin 1878 à Galston, ville située à 30 km environ au sud de Glasgow. Il était le troisième enfant d'une famille en comprenant huit. Son grand-père paternel fabriquait des batteuses, son grand-père maternel était agriculteur. Il poursuivit de brillantes études à l'université d'Edimbourg de 1805 à 1808. Ensuite, il se tourna vers des études de théologie à l'université de Glasgow pour devenir pasteur. Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jean Rankin. Ils eurent sept enfants. [1]

La vie de Robert Stirling se déroule durant le dix-neuvième siècle qui voit de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est probablement ce bouillonnement d'idées, sa curiosité naturelle et son pragmatisme qui pousseront Robert Stirling à inventer "le moteur à air chaud". Le brevet fut déposé le 27 septembre 1816 et fut effectif le 20 janvier 1817. [1]

- **L'Histoire du moteur Stirling**

Le moteur Stirling a été inventé par Robert Stirling en 1816. A cette époque, les moteurs utilisés étaient des moteurs à vapeur dont les chaudières présentaient des risques d'explosion. Robert Stirling a alors conçu un moteur à combustion externe qui utilise de l'air sous des pressions relativement faibles et non de la vapeur d'eau pour fonctionner. [2]

En 1843, avec son frère James Stirling, il matérialise son moteur dans une fonderie. Malgré tous ses efforts, le moteur développait une puissance massique trop faible par rapport à la machine à vapeur. Par ailleurs, le moteur doit être exposé à des températures élevées pour obtenir une bonne efficacité or les matériaux disponibles à l'époque se détérioraient rapidement sous l'effet des hautes températures. Le moteur de Stirling ne pouvant rivaliser avec les autres types de moteurs, il ne sera utilisé que de façon marginale pour des applications de faible puissance (*figure I.2*).[2]



*Figure I.2 : L'une des premières réalisations de moteur Stirling [2].*

Ce n'est qu'en 1871, 55 ans après l'invention du moteur, que l'ingénieur Gustav Schmidt décrit mathématiquement le cycle de Stirling, les progrès en thermodynamique sont considérables à la fin du XIXème siècle. [2]

Dans les années 1930, les études du moteur Stirling reprennent. La société néerlandaise Philips décide d'étudier son application dans plusieurs domaines. En 1938, la société réalise un moteur Stirling de plus de 200 chevaux avec un rendement supérieur à 30% mais cette technologie ne trouve d'application qu'en cryogénie (le moteur, qui est inversible, est entraîné par un moteur électrique et est utilisé comme pompe à chaleur pour produire du froid). [2]

En 1951, toujours par Philips, un moteur Stirling de 180 W est développé pour être utilisé comme groupe électrogène (*figure I.3*). Comme la réalisation de ce moteur ne pouvait se faire à un prix compétitif, seulement 150 ont été construits. Un groupe électrogène actuel des mêmes dimensions, muni d'un moteur à quatre temps, développe une puissance environ cinq fois plus élevée. Par la suite, Philips a également tenté d'équiper une voiture d'un moteur Stirling, mais cette tentative fut infructueuse en raison de la trop grande inertie thermique du moteur.[2]



*Figure I.3 : Groupe électrogène à moteur Stirling de 180 W développé par Philips dans les années 1950 [2].*

En 1996, la marine Suisse utilise un moteur Stirling pour propulser et recharger les batteries de ses sous-marins lorsqu'ils sont sous l'eau. Ces moteurs ont la particularité d'être silencieux, ce qui est primordial pour un sous-marin. Ces améliorations ont été permises grâce à l'utilisation de matériaux qui supportent de forts gradients de température. [2]

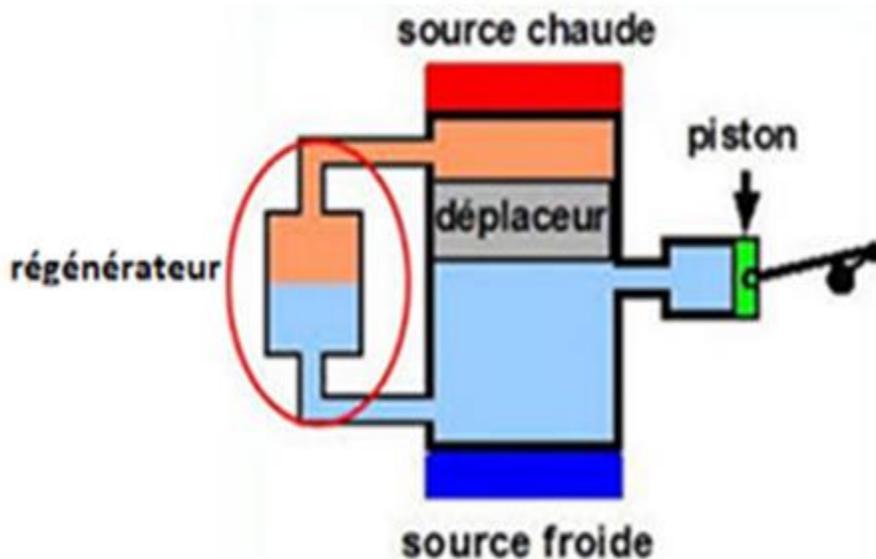
De nos jours, le moteur de Stirling présente en regain d'intérêt car il peut être combiné à l'énergie solaire. L'association d'un concentrateur solaire à un moteur Stirling (entraînant un générateur) peut en effet engendrer un rendement supérieur aux cellules photovoltaïques mais cela reste une technologie onéreuse, notamment parce que le concentrateur solaire doit nécessairement suivre la course du soleil. En 2008, grâce à cette technologie, le taux de conversion record d'énergie solaire en travail est atteint : 31,25%. Le moteur Stirling continue ainsi d'être développé par des entreprises spécialisées mais également par la NASA.[2]

### **I.3. Le fonctionnement du moteur Stirling**

Le principe de fonctionnement du moteur Stirling est relativement simple : le fluide du travail, qui produit un travail est un gaz (air, hydrogène ou hélium), est soumis à une modeste pression selon le cycle de Stirling à 4 temps, séparé par deux phases de déplacement : chauffage, détente, déplacement vers la source froide, refroidissement, compression, retour vers la source chaude. Le moteur Stirling est constitué d'un cylindre renfermant du gaz et d'un piston récupérant l'énergie mécanique et à l'intérieur du cylindre glisse un déplacement. C'est un élément qui ne modifie ni la pression, ni le volume du gaz, mais l'oblige à migrer soit vers la source chaude soit vers la source froide. Le fluide du travail utilisé subit les diverses transformations tout en restant enfermé à l'intérieur du cylindre. En revanche la chaleur est fournie depuis l'extérieur du cylindre, d'où les appellations « Moteur à air chaud » ou « Moteur à combustion externe » que l'on peut dire parfois.[3]

La source chaude du moteur Stirling peut être alimentée par une source quelconque : combustion externe des dérivés du pétrole, du gaz naturel, du charbon, du bois, etc. Mais aussi les énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique.[3]

**Remarque :** Le régénérateur est très souvent utilisé dans les moteurs Stirling : une barrière de paille de fer, ou autre milieu poreux, devant posséder une mauvaise conductivité thermique dans la direction axiale et jouer le rôle d'un réservoir thermique transitoire (Figure I.4).



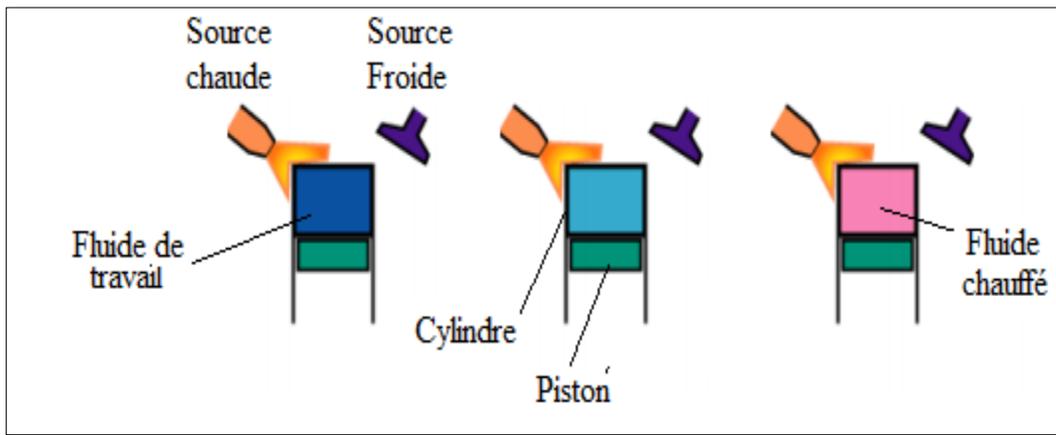
*Figure I.4 : Schéma simple du moteur Stirling avec un régénérateur [3].*

### I.3.1. Les quatre phases élémentaires

Le moteur de Stirling fonctionne grâce à 4 phase élémentaires inspirées du cycle de Carnot, pendant lesquelles le gaz utilisé subit des compression/décompressions en faisant varier la température. Ces phases expliquent son fonctionnement et restent globalement les mêmes quels que soient les types de moteurs de Stirling.[4]

- **Phase 1 : Le chauffage « isochore »**

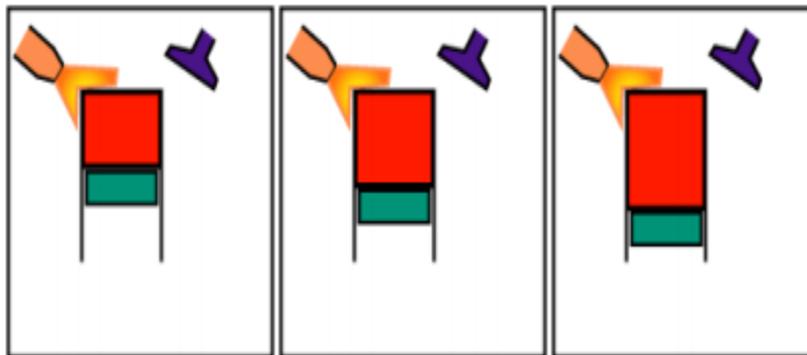
Cette étape comprime le gaz ou le fluide utilisé pour pousser le piston. Pour cela, on élève sa température avec une source chaude (soleil, combustion, électrique, nucléaire, géothermal...).[4]



*Figure I.5: Phase de chauffage.*

- **Phase 2 : Une détente « isotherme »**

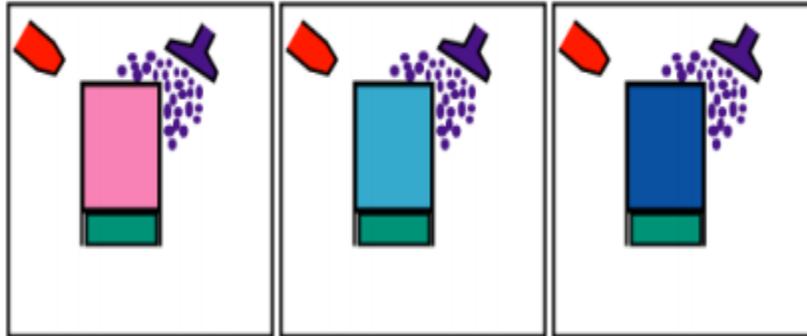
Le gaz comprimé exerce une pression sur le piston. De ce fait, son volume s'accroît et sa pression diminue. C'est pendant cette étape que l'on peut récupérer de l'énergie mécanique.[4]



*Figure I.6: Phase de détente.[4]*

- **Phase 3 : Un refroidissement isochore**

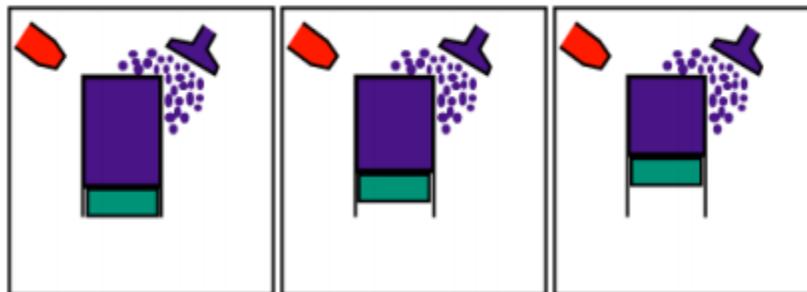
La source froide (air, eau ou autre liquide de refroidissement) récupère l'énergie thermique restante. La température et la pression du gaz diminuent.[4]



*Figure I.7: Phase de refroidissement [4]*

- **Phase 4 : Une compression isotherme**

Pendant cette étape, le piston revient à sa position initiale, ce qui décomprime légèrement le gaz en diminuant son volume.[4]



*Figure I.8 : Phase de compression [4]*

On peut réutiliser une partie de l'énergie mécanique libérée à l'étape 2 pour repousser le piston à l'étape 4.[4]

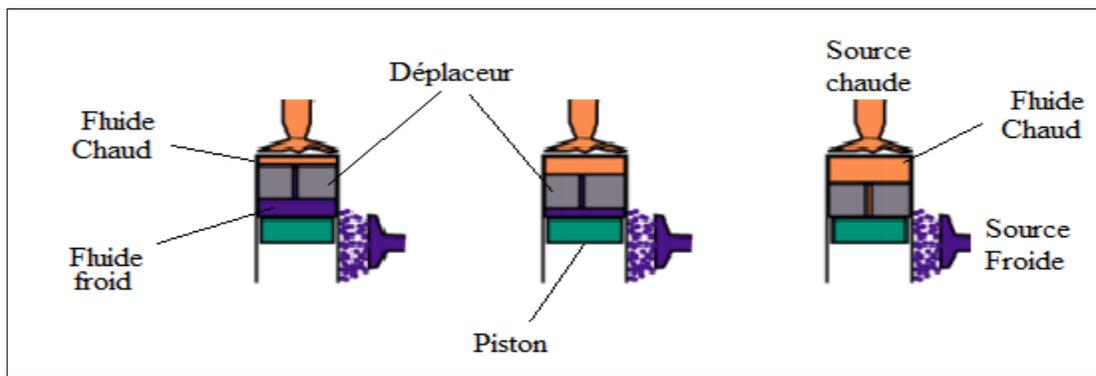
### I.3.2. Le rôle de déplaceur

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

C'est pourquoi on va introduire un artifice apportant des solutions à ces problèmes : le déplaceur. Ce dernier ne modifie ni la pression ni le volume du gaz, mais l'oblige à se situer soit vers la source chaude, soit vers la source froide (qui peuvent alors fonctionner en continu) [1].

- **Chauffage isochore**

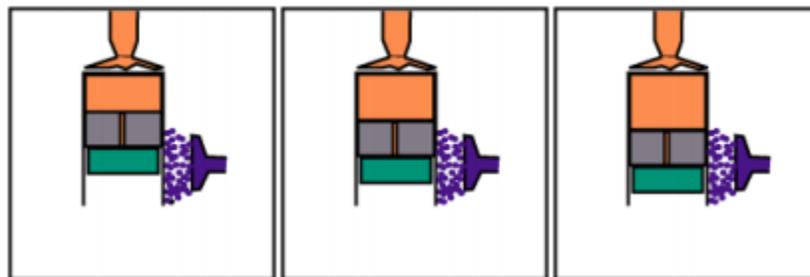
Le volume reste constant, mais le déplaceur fait passer le gaz de la partie basse (froide) à la partie haute (chaude).[1]



*Figure I.9 : 1<sup>ère</sup> phase de travail du déplaceur*

- ✓ **Détente isotherme**

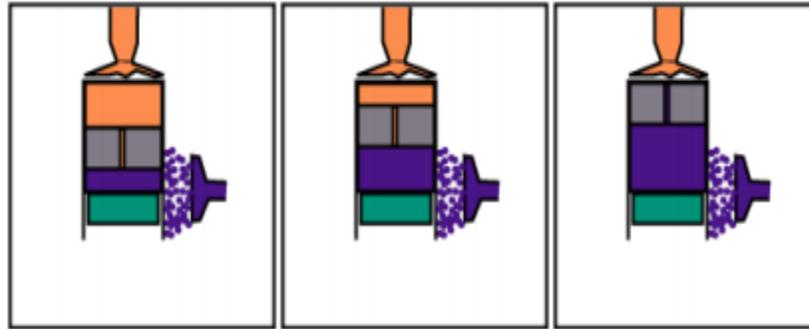
Le déplaceur suit le piston moteur au cours de la détente pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source chaude.[1]



*Figure I.10 : 2<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur [1]*

✓ **Refroidissement isochore**

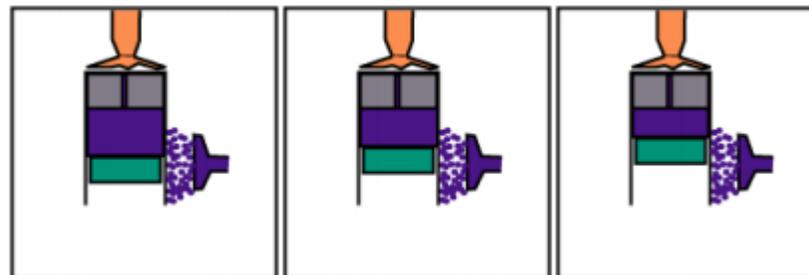
Le volume reste constant, mais le déplaceur fait passer le gaz de la partie haute (chaude) à la partie basse (froide).[1]



*Figure I.11 : 3<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur [1]*

✓ **Compression isotherme**

Le déplaceur, au cours de la compression, reste en partie supérieure pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source froide.[1]



*Figure I.12 : 4<sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur [1]*

## I.4. Les types du Moteur Stirling

Il y a deux types courants de moteurs Stirling qui ont été utilisés pour la production d'énergie :

- ✓ **Le moteur cinématique Stirling** est un moteur qui a un piston branché au vilebrequin par une bielle, fixée à un croisillon pour éliminer les forces latérales contre les parois du cylindre.
- ✓ **Le moteur à pistons libres Stirling** est un moteur à combustion externe à quatre temps, dans lequel le mouvement du piston répond uniquement à la pression du gaz, sans qu'une bielle(s) ou vilebrequin ne génère une rotation.

Il y a trois configurations de modèle de moteur de base qui ont été employées pour des moteurs Stirling. Celles-ci comprennent l'Alpha, Bêta, et les configurations Gamma [5].

### I.4.1. Moteur Configuration Alpha

Le moteur de type Alpha est un moteur ayant deux cylindres dans lesquels se déplacent deux pistons, ce qui permet de séparer l'espace froid et l'espace chaud. Au cours du cycle, le gaz de travail passe d'un piston à un autre. Les pistons sont placés avec un angle de 90 degrés afin que le piston de l'espace froid soit en retard de  $\frac{1}{4}$  de tour sur le piston de l'espace chaud .[5]

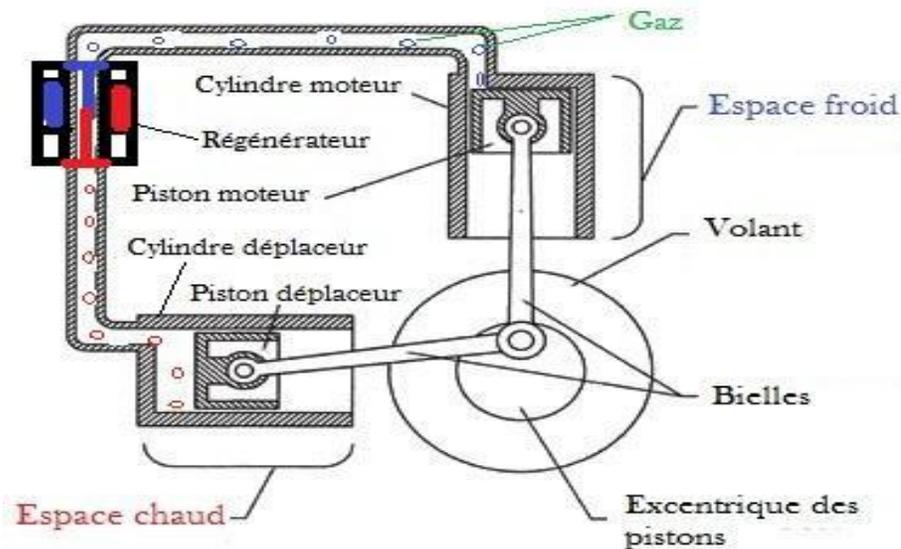
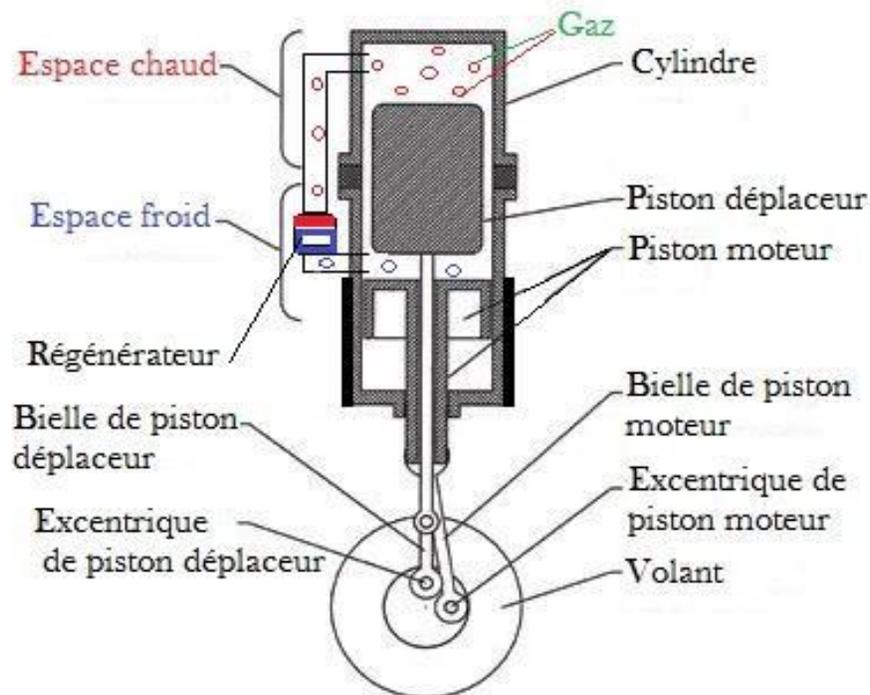


Figure I.13: Schéma du moteur type ALPHA [5]

Ce type de moteur a un très bon rapport puissance par rapport au volume mais demande des températures assez importantes pour sa mise en marche.

#### I.4.2. Moteur Configuration Beta

Le moteur Béta présente une différence radicale avec le moteur Alpha. Il ne possède qu'un seul cylindre combinant l'espace chaud et l'espace froid. De plus les deux pistons, moteur et déplaceur sont parfaitement étanches. Ces pistons combinent un mouvement relatif lors du changement de volume du gaz avec un mouvement commun qui déplace ce volume de la partie chaude à la partie froide, et vice-versa.[5]



*Figure I.14: Schéma du moteur type BETA [5]*

Ce type a deux avantages principaux, sa compacité et l'absence de perte aérodynamique lors du transfert du gaz d'une partie à l'autre du cylindre. Cependant il existe des transferts thermiques de conduction à l'intérieur de ce cylindre qui peuvent diminuer la différence de température entre la zone chaude et la zone froide ce qui réduit donc un peu son rendement. Puisque les pistons des moteurs bêta sont tous deux dans le même cylindre ce qui complique sensiblement la construction

mais permet de réduire l'espace mort entre le piston moteur et celui du déplacement en les faisant balayer un espace commun.[5]

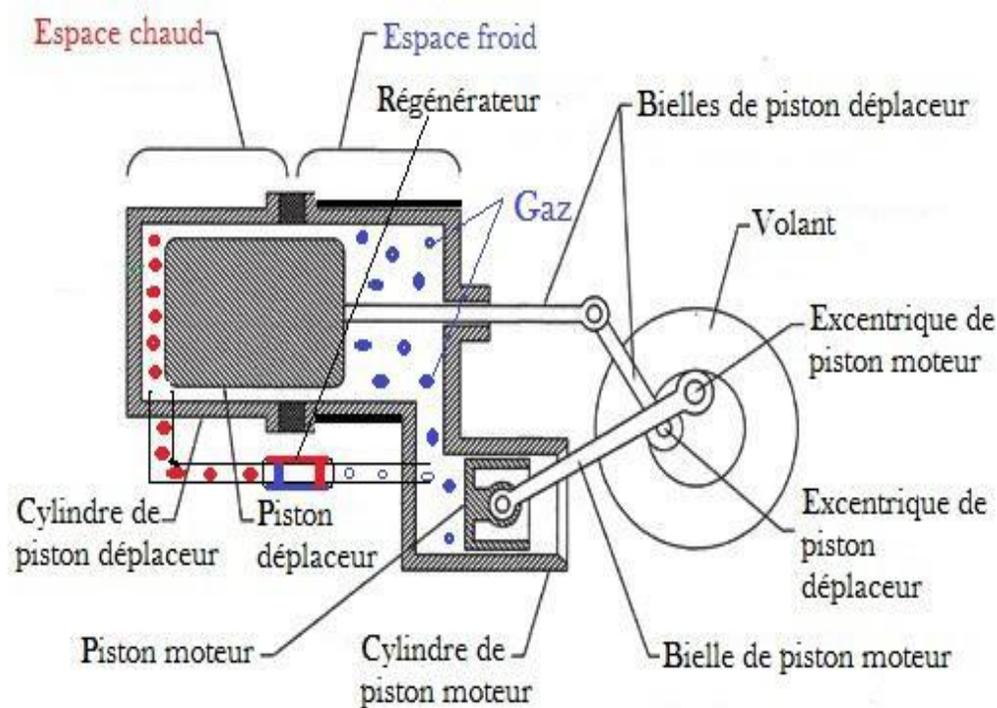
### 1.4.3. Moteur Configuration Gamma

Le moteur Gamma est un mélange entre le moteur Alpha et le moteur Béta. Dans un cylindre le piston déplaceur joue son rôle, dans l'autre le piston moteur fait varier le volume global et récupère l'énergie. Ce moteur est bicylindre, il est composé d'un piston moteur et un piston déplaceur. Le piston déplaceur déplace le gaz d'une zone à une autre.

Le gaz subit des variations de températures qui engendrent à leur tour des variations de pression qui mettent en mouvement le piston moteur. [5]



*Figure I.15: Moteur type gamma [5]*



*Figure I.16: Schéma du moteur type GAMMA [6]*

Les moteurs de ce type sont assez simples à concevoir du fait de leur mécanique peu complexe. Leur rendement est moins important que ceux des types présentés plus haut mais ils peuvent fonctionner avec de très faibles écarts de température, c'est à dire que pour certains de ces moteurs l'écart peut être de seulement  $5^{\circ}\text{C}$  (des petits moteurs de ce type sont capables de tourner seulement grâce à la chaleur d'une main humaine) . [6]

## **I.5. Application des moteur stirling**

La diversité des configurations de moteurs stirling a permis d'élargir leurs champs d'application.. Ces dernières s'étalent sur plusieurs domaines dont nous citons :

### **I.5.1. Conversion de l'énergie solaire en électricité**

la technique stirling solaire est considérée comme la plus efficace des méthode de conversion de l'énergie solaire en électricité, environ deux fois plus efficace que autres technologies solaires alternatives (maier et al. 2007). Cette technique consiste à concentrer le maximum des rayons solaire 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 (Dish-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.[7]



*Figure I.17 : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish (Nepven et al. 2006).[8]*

### **I.5.2. Domaine militaire**

Plusieurs sous-marins propulsés par des moteurs Stirling ont été fabriqués. Le fonctionnement silencieux des moteurs Stirling est particulièrement apprécié. De plus, la combustion externe peut être réalisée avec du fuel et de l'oxygène déjà sous pression et les gaz d'échappement 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 plus grand sous-marin commercial du monde (Sauzade et al. 1991) [9] : le SAGA (sous-marin d'Assistance à Grande Autonomie). Il a été propulsé par deux moteurs Stirling de puissance 75 kW chacun, il fût mis en service au début des années 60.

### I.5.3. Domaine spatiale



*Figure I.18 : Stirling solaire devant le Pentagone en juin 1998 [10].*

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

La NASA et la société Cummins effectue actuellement des recherches pour la production d'électricité à partir du soleil [10].

Elle a toujours été en pointe dans ce domaine. Elle a développé un moteur Stirling à piston libre qu'on peut voir sur la figure. La NASA réfléchit à une petite centrale nucléaire produisant la chaleur nécessaire à un moteur Stirling à piston libre. La source froide serait constituée par de grands radiateurs. Le moteur Stirling devra avoir un bon rendement et surtout un très bon rapport Puissance / Masse. Ce dernier point est capital dans le domaine spatial pour limiter la masse de carburant embarqué par la fusée de lancement.

Cette configuration de la machine de Stirling est utilisée dans les Cryo générateurs en spatial pour refroidir les capteurs infrarouges. Le milieu militaire est également intéressé par cette application : vision infrarouge (ex : refroidisseurs cryogéniques SUNPOWER) [10].

#### I.5.4. Domaine de l'informatique

Un ventilateur ça consomme du jus à pure perte. En effet, il est déjà énergétiquement assez peu efficace d'avoir un processeur qui se prend pour un barbecue coréen mais griller des watts supplémentaires pour évacuer cet excédent calorifique ne fait qu'aggraver encore le problème.

Fort de ce constat, la société MSI a eu une idée bien sympathique. Pourquoi ne pas simplement utiliser cette énergie perdue sous forme de chaleur pour... refroidir le processeur ? Pas possible ? Mais si, mais si, grâce à un moteur de Stirling ![10]



*Figure I.19 : Micro-processeur refroidi par moteur Stirling  
Le ventilateur de MSI.[10]*

On a vu apparaître, récemment, une utilisation très spécifique du moteur Stirling pour refroidir un micro-processeur d'ordinateur.

C'est bien là la bonne idée de MSI, utilisé un tel moteur en prenant la zone chaude du processeur comme source d'énergie. Le cycle compression/décompression va ainsi activer un piston qui va à son tour faire tourner un ventilateur.

Il s'agit d'un micro-moteur Stirling qui utilise l'énergie thermique dissipée par le microprocesseur. Ce petit moteur entraîne un ventilateur qui dissipe le restant 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". Certains évaluent à 70% la chaleur dissipée de la sorte.

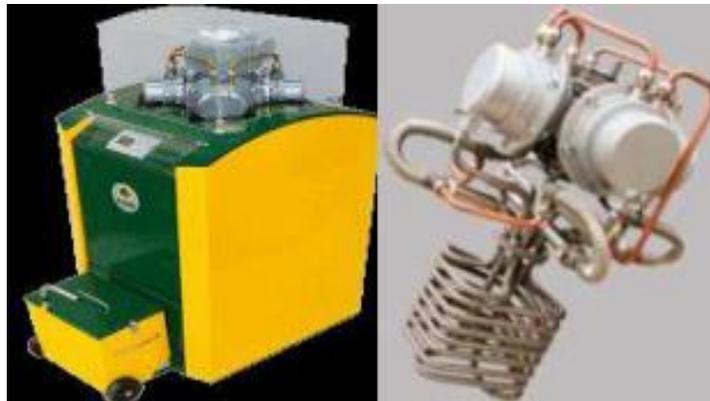
Le ventilateur ne refroidit évidemment pas directement le processeur, mais deux caloducs (ou « heatpipes »). Pour info, un caloduc se présente sous la forme d'un tube fermé ne contenant qu'un seul gaz. D'un côté le tube touche la zone chaude du processeur, de l'autre il est soudé à une multitude d'ailettes pour augmenter la surface de contact avec l'air. Le gaz en équilibre liquide va

se vaporiser au contact de la zone chaude « pompant » ainsi des calories. Maintenant plus léger, le gaz monte vers la partie « à ailettes ». Là notre ventilateur « de Stirling » souffle un air plus froid qui va provoquer la condensation du gaz. A nouveau liquide et donc plus lourd, notre gaz retombe sur la zone chaude, et ainsi de suite. Simple, et efficace.

Ceci dit l'utilisation du moteur de Stirling pour du refroidissement existe déjà depuis longtemps du côté industriel et militaire. Mais malgré cela, et même si pour l'instant prix et efficacité réel ne sont pas connus, l'arrivée de cette technologie permettant de limiter l'énergie consommée par nos consommateurs de watts est en soit une nouveauté qui méritait d'être soulignée [10].

### I.5.5 Domaine de cogénération

Des systèmes de cogénération sont commercialisés, ils sont composés d'une chaudière classique qui fournit la chaleur habitations et un moteur Stirling couplé à cette dernière qui récupère les pertes de chaleur (dans les fumées par exemple) pour les convertir en électricité [11]. Dans le contexte actuel d'économie des énergies, ce genre d'installation pourrait représenter un bon débouché pour le moteur Stirling.



*Figure I.20: Chaudière à bois Stirling (Stirling power model).[8]*

### I.5.6. Domaine du transport : Voiture hybride

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.

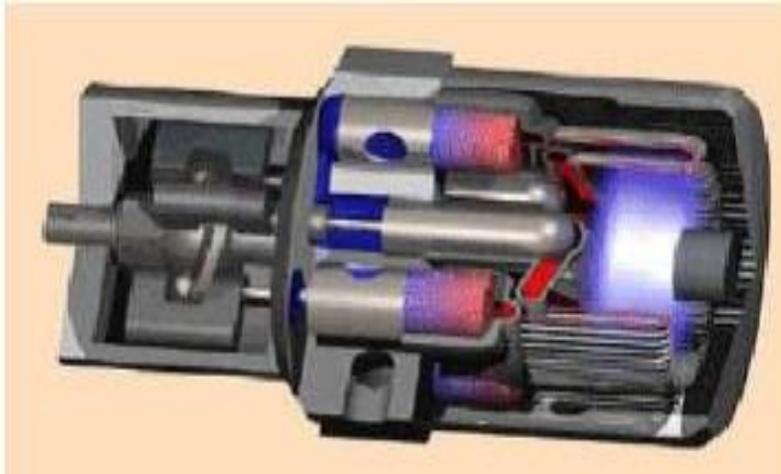
Des suédois de la société PRECER ont conçu un véhicule électrique de démonstration « bioracer » dont les batteries se rechargent à l'aide d'un moteur Stirling. Il s'agit en fait d'une technologie que la société peut décliner dans chacune de ses 5 branches d'activité : Automobiles, transport routier, équipements mobiles, équipements maritimes et centrales de cogénération domestiques. 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.[8]



*Figure I.21: Moteur Stirling d'une voiture hybride.[12]*

### **I.5.7. Domaine industriel**

La réversibilité du moteur Stirling permet de produire du froid d'une façon industrielle et avec un rendement appréciable. Quatre pistons à double action transfèrent un gaz (hélium ou hydrogène) et récupèrent l'énergie. Leur disposition axiale autorise un faible encombrement et une bonne compacité de l'ensemble. Ce moteur (Figure 1.22) peut délivrer 30 kW et a une durée de vie sans entretien de 60000 heures (7 ans sans interruption). La vitesse de rotation en sortie est de 1800tr/mn et le rendement atteint 40% [13].



*Figure I.22: Moteur Stirling type STM 4-120 (Boucher, 2002)[8]*

## I.7. Les avantages et les inconvénients de moteur Stirling

### I.7.1. Les avantages

- **Silence de fonctionnement** : Il n'y a pas de détente à l'atmosphère à comme dans le cas d'un moteur à combustion interne .la combustion est continue à l'extérieur du ou des cylindres. De plus, sa conception est telle que ce moteur est facile à équilibrer et il engendre peu de vibration grâce a l'absence d'explosion, l'absence de valves qui s'ouvrent et se ferment et l'absence de gaz qui s'échappent. Cela le rend silencieux et réduit les contraintes mécaniques.
- **Rendement élevé** : il peut atteindre les environs de 45%, tandis que l'efficacité thermique d'un moteur à explosion peut atteindre 30%pour l'essence, 45% pour le diesel et 15% pour les panneaux photovoltaïques.
- **Multitude de « sources chaudes » possibles** : Du fait de son mode d'alimentation en chaleur ce moteur peut fonctionner à partir de n'importe quelle source de chaleur : combustion d'un carburant quelconque, énergie solaire, énergie géothermique, énergie nucléaire, ou encore chaleur humaine.
- **Aptitude écologique** : Il répond le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Dans ce type de moteur, il est plus facile de réaliser une combustion complète des carburants.

- **Fiabilités maintenance aisée** : La simplicité technologique de ce moteur permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité nécessitant peu maintenance
- **Durée de vie** : Du fait de sa simplicité, la durée de vie de ce moteur est, en théorie, plus longue que celle des moteurs classiques. En effet, il nécessite un entretien moindre et son remplacement est beaucoup plus rapide et moins dangereux.
- **Cycle réversible** : Un moteur Stirling entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur capable de refroidir à  $-200^{\circ}\text{C}$  ou de chauffer à plus de  $700^{\circ}\text{C}$ , selon le sens d'entraînement.
- **Utilisations très diverses** : Du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaud (du mW au MW). La composition simpliste du moteur permet d'imaginer de nombreuses configurations pour des applications très diverses.

### I.7.2. Les inconvénients

- **L'étanchéité des pistons** est plus importante que dans un moteur à combustion interne et est plus difficile à réaliser à cause des très fortes variations de température et de la nécessité, afin de minimiser les pertes par frottement (en particulier dans le régénérateur), d'utiliser un gaz le moins visqueux possible. Avec cet inconvénient que le gaz le moins visqueux, par exemple l'hydrogène, est aussi celui qui fuit le plus facilement.
- **Conception délicate** : alors que les moteurs à combustion interne produisent la chaleur directement au sein du fluide, très vite et de façon très homogène, un système Stirling repose sur des transferts thermiques entre le gaz et les échangeurs (les deux sources, le récupérateur), alors que les gaz sont des isolants thermiques où les échanges sont très lents. De plus, il faut minimiser le volume « mort » (contenant du fluide qui n'accomplit pas le cycle et donc ne contribue pas au rendement). Tout cela pose des problèmes de dynamique des fluides, problèmes difficiles à résoudre, au niveau des échangeurs, du récupérateur, des tuyaux ou du piston qui permettent le déplacement du gaz au cours du cycle (problèmes de diamètre, de longueur, de turbulences à créer ou éviter, etc.) ;
- **Difficile à commander** : l'un des inconvénients est le manque de réactivité. Pour faire varier la puissance du moteur on fait en général varier la puissance de chauffe. Or à cause

de la grande inertie thermique des échangeurs, l'augmentation de puissance est beaucoup plus lente que celle des moteurs à combustion interne courants.

- **La variation de régime de ce moteur est difficile à réaliser**, car elle ne peut se faire qu'en agissant sur le taux de compression du fluide de travail ou en augmentant la chaleur de la source chaude, ou en diminuant celle de la source froide. Cet inconvénient peut se corriger, à l'aide de procédés tels qu'une boîte de vitesses dans le cas de l'entraînement d'un arbre de transmission vers des roues, ou de changement de pas dans celui de l'entraînement d'une hélice. C'est pourquoi le moteur Stirling est considéré comme ayant une très mauvaise aptitude à produire une puissance et un couple variable, inconvénient considéré comme très important pour la propulsion automobile, notamment, alors que c'est justement cette application qui a fait la fortune du moteur à combustion interne. Cependant cet inconvénient pourrait se réduire dans le cas d'un « système hybride » (le moteur marche alors à régime constant, la modulation de puissance étant prise en charge par le système électrique), mais ils sont encore rares.
- **Prix élevé** : n'ayant aujourd'hui que peu d'applications en grande série, contrairement au moteur à combustion interne, il est bien plus cher ; de plus, pour la même raison, les industriels ne lui accordent pas le même intérêt en termes de recherche et développement, ce qui ne lui permet pas de combler son retard (en supposant cela possible). Cette situation pourrait évoluer favorablement avec le développement des recherches sur la production d'énergie et particulièrement sur celles concernant les énergies renouvelables.

## I.8. Conclusion

Grace à ses avantages, on peut affirmer que l'usage du moteur Stirling pourrait, dans un avenir proche, devenir la solution des problèmes économiques et environnementaux qui préoccupent actuellement la communauté internationale.

# CHAPITRE II

## Etude thermodynamique du moteur Stirling

## II.1. Introduction

Le premier modèle mathématique modélisant un moteur Stirling a été développé cinquante ans après l'invention du moteur lui-même. La principale hypothèse de ce modèle est que le réchauffeur et l'espace de détente sont à la même température qui est celle de la source chaude, et le refroidisseur ainsi que l'espace de compression sont également à la même température représentant celle du puits froid. Le deuxième modèle est le modèle adiabatique qui a été développée par Finkelstein (1961). Dans ce modèle, les espaces sont supposés adiabatiques, et la notion des températures conditionnelles causées par la discontinuité de celles entre les différents espaces de travail est introduite. Le troisième modèle, est le modèle quasi-stationnaire. La différence majeure entre ce modèle et le modèle adiabatique est que la température du gaz n'est ni égale à la température des parois de l'échangeur associé, ni constante durant un cycle. Les échangeurs sont aussi considérés non idéaux.

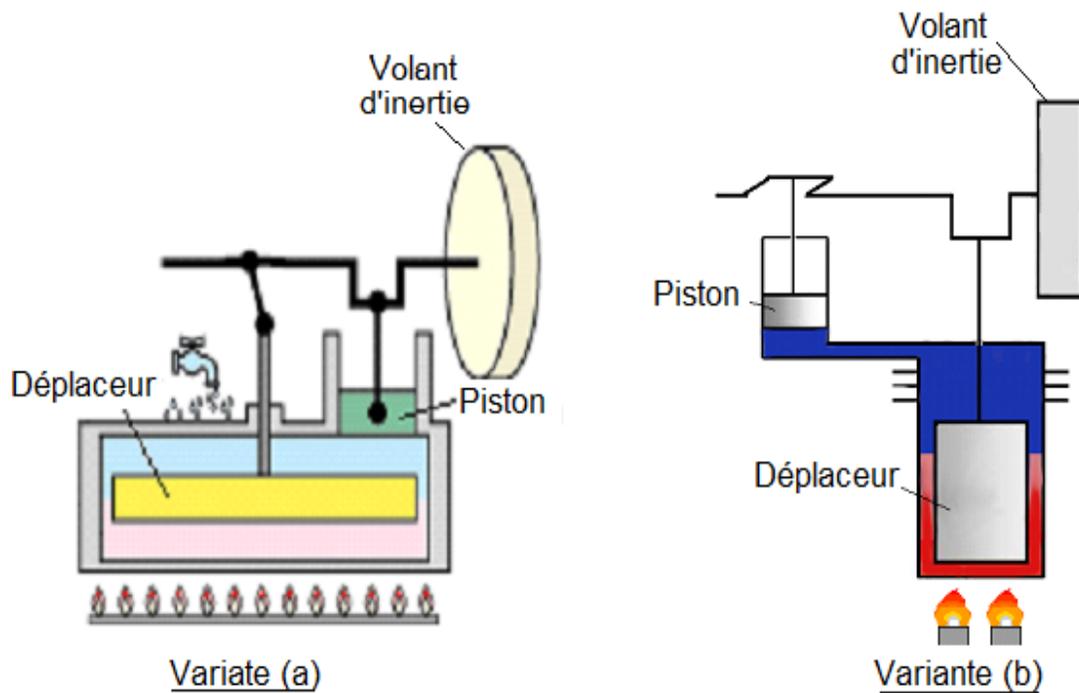
Dans notre travail, nous avons adoptés le modèle adiabatique (analyse découplée sans pertes) et le modèle quasi-stationnaire (analyse découplée avec pertes) initialement développé par Urieli et Berchowitz (1984). Dans ces modèles thermodynamiques, l'hypothèse d'un gaz parfait a été remplacée par celle d'un gaz réel obéissant à l'équation d'état de van der Waals.

## II.2. Choix du type de moteur

Le moteur Stirling de type gamma est généralement utilisé pour des petites différences de température entre la source froide et la source chaude. C'est pour cette raisons nous donne des très petites puissances (de l'ordre du watt).

Dans la pratique, on trouve deux variantes du moteur Stirling modèle gamma (voir figure ci-dessous) :

- **Variante (a) :** *Cylindres-en contactes directe.* La forme du volume de cylindre du piston de travail est en contacte directe avec le volume de cylindre du déplaceur.
- **Variante (b) :** *Cylindres en contactes indirecte.* Les deux cylindres du déplaceur et de travail sont séparés par une conduite refroidie, dans laquelle le fluide de travail se déplace entre les deux volumes.



(a) Cylindres-en contact direct.

(b) Cylindres en contact indirecte.

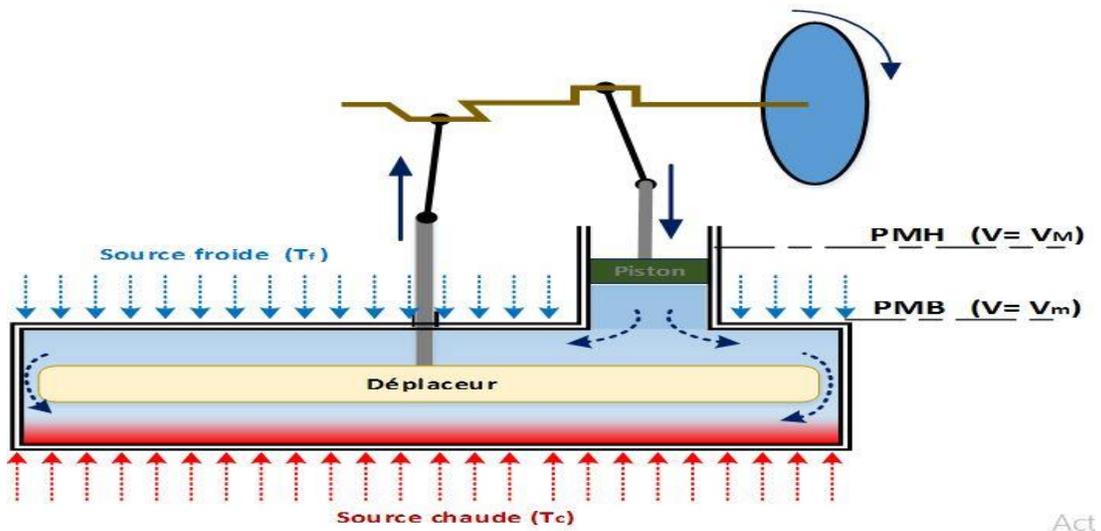
*Figure II.1 : Représentations des deux variantes du moteur Stirling modèle Gamma [12]*

Pour notre projet de fin d'étude le model choisi pour l'étude et la réalisation c'est le Moteur Stirling modèle  $\gamma$  variante (a).

### II.3. Principe de fonctionnement du modèle a étudié

#### 1) La compression

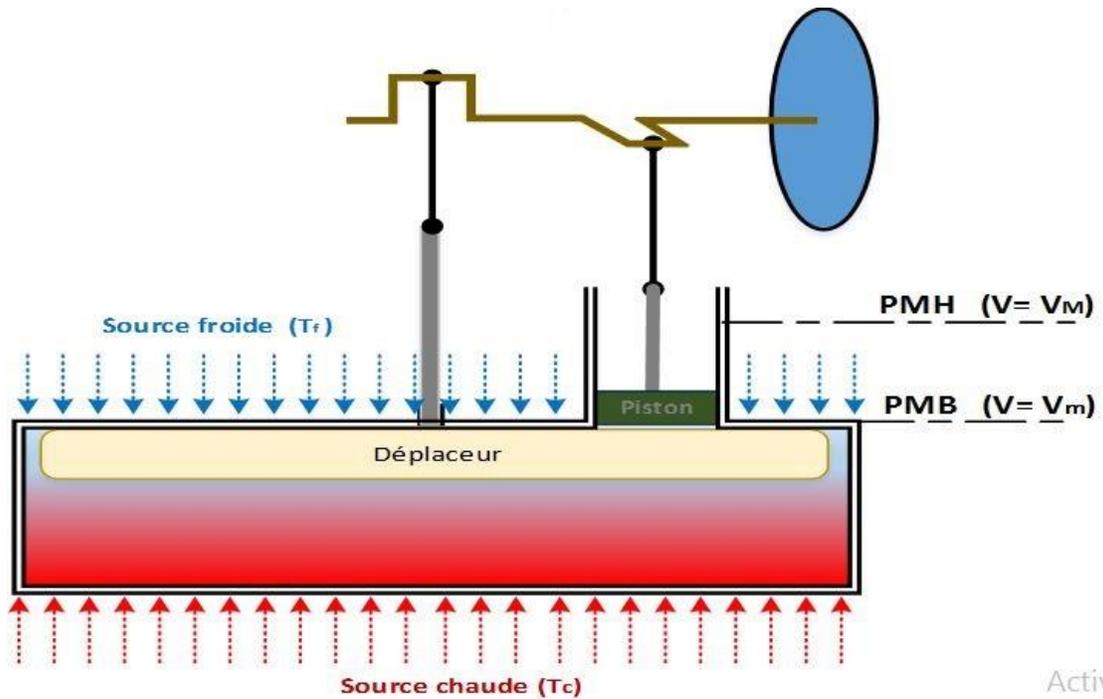
A cause de l'effet de l'inertie du volant, le piston se déplace du point PMH vers le point MPB en comprimons l'air du volume  $V_{\max}$  au  $V_{\min}$ , et au même temps le déplaceur monte vers le haut .[12]



*Figure II.3 : Compression isotherme[12]*

## 2) L'échauffement

La roue, mise en rotation par la descente du petit piston, a de nouveau acquis de l'inertie : sa rotation se poursuit durant un dernier quart de tour au cours duquel il va tirer le déplaceur vers le haut. Ce dernier a déplacé tout l'air vers le bas, lequel se réchauffe et l'on revient au point 1 du cycle.[12]



*Figure II.4 : Echauffement isochore [12]*

### 3) La détente

Le déplaceur est en haut de l'enceinte : de l'air se trouve en dessous mais pas au-dessus. A cause de la source chaude, la face inférieure du socle se réchauffe. L'air dans l'enceinte se détend et le petit piston est poussé vers le haut, entraînant la roue qui fait alors un quart de tour.[12]

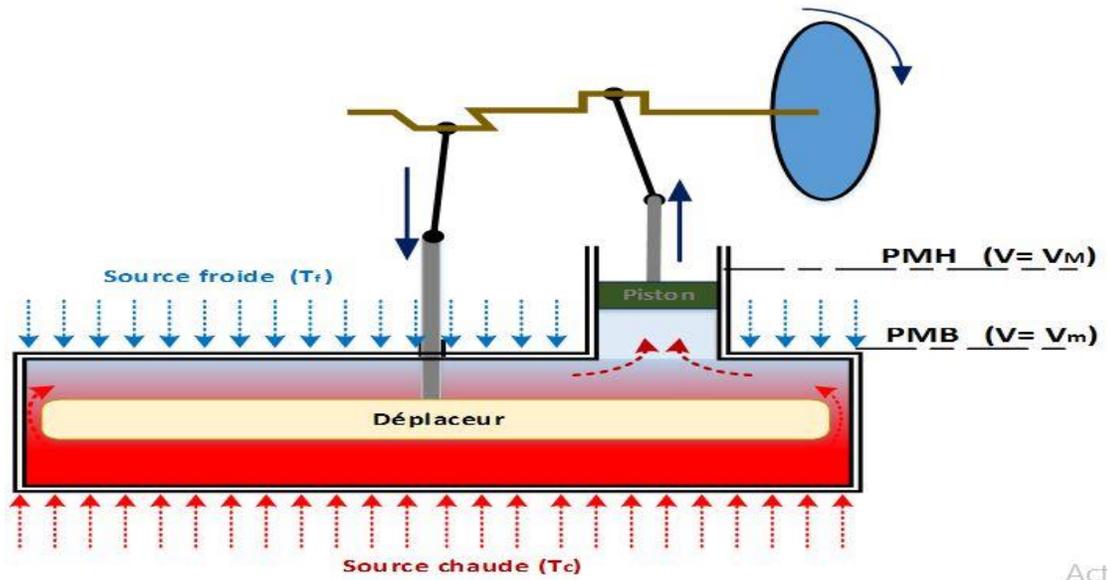


Figure II.5 : Détente isotherme[12]

4) Le refroidissement

La roue à inertie, maintenant en rotation, a acquis de l'énergie, de l'inertie : il continue donc de tourner (un nouveau quart de tour) et il pousse le déplaceur tout en bas. Ce dernier déplace tout l'air au-dessus de lui, ce qui le refroidit au contact de la plaque supérieure.[12]

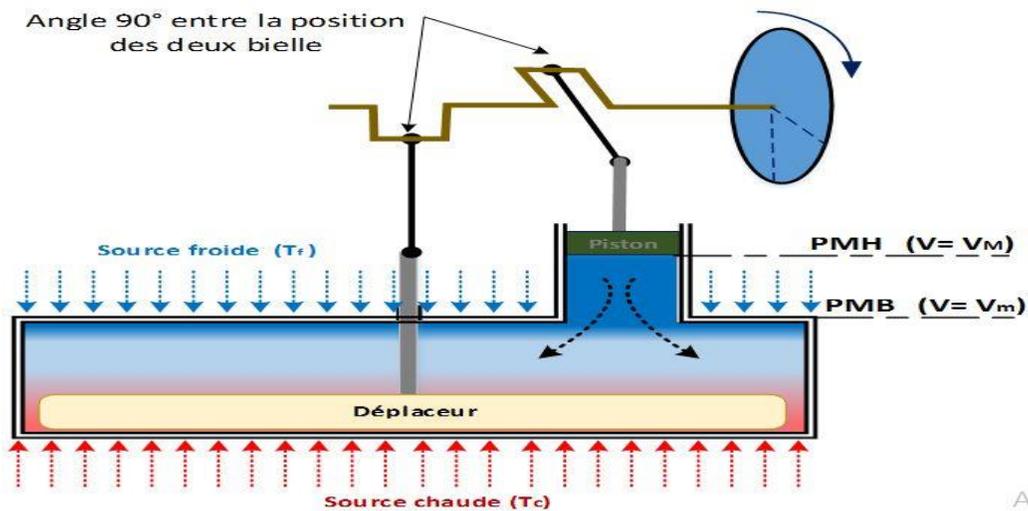


Figure II.6 : Refroidissement isochore[12]

Ces quatre étapes se suivent dans cet ordre. C'est uniquement l'action du petit piston qui provoque la rotation de la roue et le fonctionnement du moteur. Le déplaceur n'est là que pour brasser l'air et le faire alternativement entrer en contact avec la plaque chaude et la plaque froide.

#### II.4. Cycle thermodynamique de moteur Stirling théorique

Comme ont cité ci-dessus au chapitre 1 le cycle thermodynamique de Stirling est inspiré du cycle de **Carnot** (2 Isothermes à  $T_F$  et  $T_C$  + 2 Isentropique) seulement ici les deux isentropique est remplacé par deux isochore un pour l'apport de chaleur après compression et l'autre pour le rejet de la chaleur non convertie en travail après détente.

Le cycle est le même que la plupart des cycles thermiques, il comprend quatre phases ; (1) Compression, (2) Chauffage, (3) Détente et (4) Refroidissement. Ces phases sont bien montrées dans la figure ci-dessous :

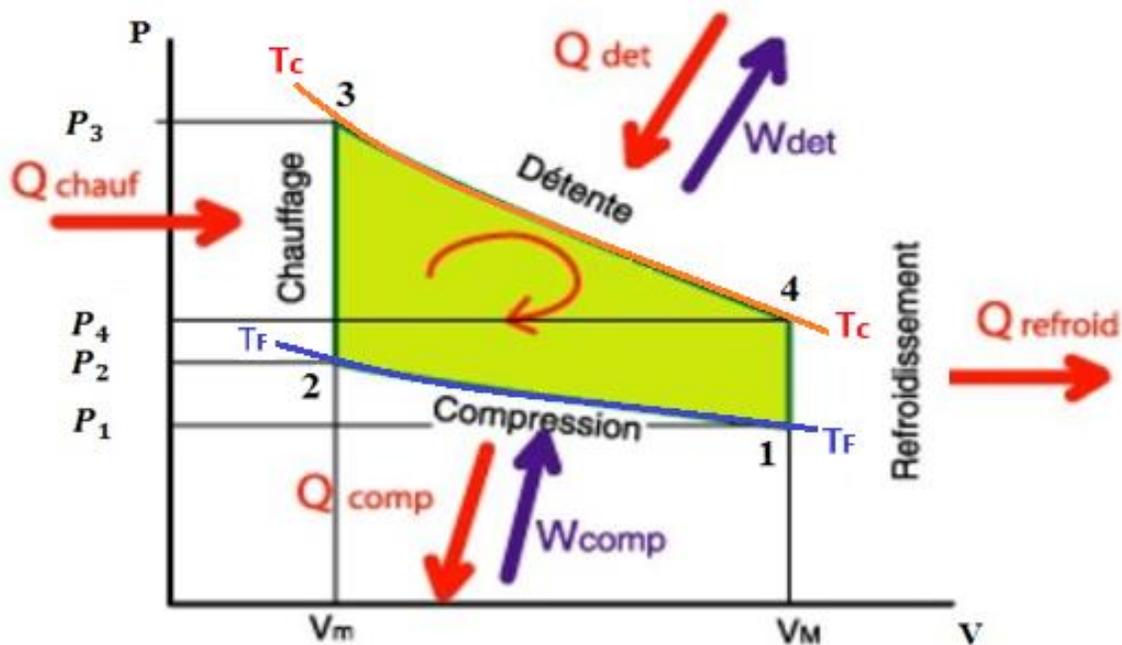


Figure II.7 : Diagramme d'un moteur Stirling théorique [14]

- **Point 3 à 4**, détente isotherme. La zone de détente est chauffée par l'extérieur, ainsi le gaz suit une détente isotherme.
- **Point 4 à 1**, refroidissement à volume constant (isochore). Le gaz passe dans le régénérateur, se refroidit en lui transférant sa chaleur qui sera utilisée pour le cycle suivant.
- **Point 1 à 2**, compression isotherme. La zone de compression est refroidie, ainsi le gaz suit une compression isotherme.
- **Point 2 à 3**, chauffage isochore. Le gaz ne circule dans le régénérateur et prélève de la chaleur.

#### II.4.1. Etude thermodynamique

Pour comprendre le principe du fonctionnement du moteur Stirling, il est nécessaire de connaître peu de choses, on considère que le gaz utilisé (air, hydrogène, hélium, azote...) est un gaz parfait,  $PV = nRT$  où  $P$  représente la pression du gaz,  $V$  son volume,  $n$  la quantité de gaz,  $R$  la constante moléculaire du gaz et  $T$  la température du gaz.

Selon le bon vieux principe « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » on peut aborder les échanges d'énergie au cours d'un cycle de Stirling par exemple : toute perte d'énergie calorifique au cours d'un cycle est égale aux gains en énergie mécanique au cours de ce même cycle.

En énergie mécanique, on récupère  $W_{\text{det}}$  mais on fournit  $W_{\text{comp}}$ . Le bilan global devient donc, en stipulant que l'énergie calorifique perdue a été transformée intégralement en énergie mécanique [15].

#### II.4.2. Les formules thermodynamiques utilisées pour les calculs

Le fluide de travail dans le moteur Stirling est supposé parfait et obéissant à l'équation des gaz parfaits :

$$PV = nRT = m \frac{R}{M} T = mrT \quad (1)$$

### II.4.2.1. Les volumes

Disons que les volumes contenus dans le réchauffeur, le refroidisseur sont exprimés en mètres cubes et son respectivement exprimés par :

➤ Le volume d'air contenu dans ce moteur  $V_{\max}$  :

$$V_{\max} = V_{gc} + V_{pc} \quad (2)$$

D'où :

$$\begin{cases} V_{gc} : \text{est le volume de grand cylindre} \\ V_{pc} : \text{est le volume de petit cylindre} \end{cases}$$

➤ Le volume de grand cylindre  $V_{gc}$  :

$$V_{gc} = V_{cyl} - V_d - V_{td} \quad (3)$$

D'où :

$$\begin{cases} V_{cyl} : \text{est le volume de cylindre} \\ V_d : \text{est le volume de déplaceur} \\ V_{td} : \text{est le volume de la tige de déplaceur} \end{cases}$$

$$V_{cyl} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} \quad (4)$$

$$V_d = \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d \quad (5)$$

$$V_{td} = \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 (h_{cyl} - h_d) \quad (6)$$

donc l'équation(3) devient :

$$V_{gc} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d - \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 (h_{cyl} - h_d) \quad (7)$$

➤ Le volume de petit cylindre  $V_{pc}$  :

$$V_{pc} = \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p) \quad (8)$$

$h_p$  : est la hauteur de piston

On remplace les équations (7) et (8) dans l'équation (2) :

$$V_{\max} = \pi \left( \frac{D_{\text{cyl}}}{2} \right)^2 \cdot h_{\text{cyl}} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d - \pi \left( \frac{D_{\text{td}}}{2} \right)^2 (h_{\text{cyl}} - h_d) + \pi \left( \frac{D_{\text{pc}}}{2} \right)^2 \cdot (h_{\text{pc}} - h_p) \quad (9)$$

➤ Le volume minimal  $V_{\min}$  :

$$V_{\min} = V_{\text{cyl}} - V_d \quad (10)$$

$$V_{\min} = \pi \left( \frac{D_{\text{cyl}}}{2} \right)^2 \cdot h_{\text{cyl}} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \quad (11)$$

➤ **La masse de l'air  $m_{\text{air}}$  :**

$m_{\text{air}}$  Correspond à la masse totale de l'air contenu dans le moteur en (Kg), elle est définie comme suit :

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V_{\text{air}} \quad (12)$$

$$V_{\text{air}} = V_{\max}$$

#### II.4.2.2. Les pressions :

Les pressions son définie par l'unité de pascal, et chaque transformation est définie par :

➤ 1 → 2 : Compression isotherm ( $V_1 = V_{\max}, T_1 = T_2 = T_f$ )

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} r T_1 \quad (13)$$

Donc :

$$P_1 = \frac{m_{\text{air}} r T_1}{V_1} \quad (14)$$

➤ 2 → 3 : Chauffage isochore ( $V_2 = V_{\min}, T_2 = T_f$ )

$$P_2 V_2 = m_{\text{air}} r T_2 \quad (15)$$

Donc :

$$P_2 = \frac{m_{\text{air}} r T_2}{V_2} \quad (16)$$

➤ 3 → 4 : Détente isotherme ( $V_3 = V_{\text{min}}, T_3 = T_4 = T_c$ )

$$P_3 V_3 = m_{\text{air}} r T_3$$

Donc :

$$P_3 = \frac{m_{\text{air}} r T_3}{V_3} \quad (17)$$

➤ 4 → 1 : Refroidissement isochore ( $V_4 = V_{\text{max}}, T_4 = T_c$ )

$$P_4 V_4 = m_{\text{air}} r T_4$$

Donc :

$$P_4 = \frac{m_{\text{air}} r T_4}{V_4} \quad (18)$$

#### II.4.2.3. Les chaleurs :

Définit en joule (j), appliquant le premier principe de la thermodynamique pour chaque transformation du cycle on aura comme suit :

$$\Delta U = Q + W \quad (19)$$

➤ **Chaleur  $Q_{1-2}$**

$$dU_{1-2} = \partial Q_{1-2} + \partial W_{1-2} = 0 \text{ (la température est constante)} \quad (20)$$

$$\text{Donc : } \partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = PdV \quad (21)$$

$$\text{or } P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V} \quad (22)$$

$$Q_{1-2} = m_{\text{air}} r T_f \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (23)$$

➤ **Chaleur  $Q_{3-4}$** 

De même pour  $Q_{3-4}$  on trouve :  $Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_4}{V_3} \right)$  (24)

➤ Pour  $Q_{2-3}$  et  $Q_{4-1}$  on a :

$$Q_{2-3} = m_{\text{air}} C_v (T_3 - T_2) \text{ et } Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_1 - T_4) \quad (25)$$

Alors :

$$Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_f - T_c) \quad (26)$$

Soit  $n$  moles d'un gaz parfait a pression  $P$  et a température  $T$  confinées dans un volume fixe  $V$ .  
Si on ajoute une quantité de chaleur  $Q_v$ , la température augmente de  $\Delta T$  et la pression de  $\Delta P$ .

D'après la 1ere loi de la thermo,  $\Delta U = Q_v - W = n C_v \Delta T - W$ .

Mais ici aucun travail ne s'effectue puisque  $\Delta V = 0$ . La chaleur ajoutée sert entièrement à accroître l'énergie interne.

Ce qui donne :  $C_v = \frac{1}{n} \frac{\Delta U}{\Delta T}$

D'autre part l'énergie interne d'un gaz diatomique parfait est  $U = \frac{5}{2} n R T$

Donc  $\Delta U = \frac{5}{2} n R \Delta T$ . On obtient ainsi :

$$C_v = \frac{1}{n} \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{1}{n} \frac{\frac{5}{2} n R \Delta T}{\Delta T} = \frac{5}{2} R \quad (27)$$

Donc :  $C_v = \frac{5}{2} r$

$$Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r (T_3 - T_2) \quad (28)$$

$$\text{Donc : } Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r (T_c - T_f) \quad (29)$$

**II.4.2.4. Les travaux :**

Est définie en joule (j), correspond aux deux transformations isotherme  $W_{1-2}$  et  $W_{3-4}$ . on peut l'exprimer comme suit :

$$\partial W_{1-2} = -\partial Q_{1-2} = -PdV \quad (30)$$

$$\text{or } P = \frac{m_{\text{air}}rT}{V}$$

$$W_{1-2} = -m_{\text{air}}rT_f \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = m_{\text{air}}rT_f \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (31)$$

$$W_{3-4} = -m_{\text{air}}rT_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = m_{\text{air}}rT_c \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \quad (32)$$

$$W_{2-3} \text{ et } W_{4-1} = 0 \text{ (Volume constant)}$$

Donc

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1} \quad (33)$$

$$W = m_{\text{air}}rT_f \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + m_{\text{air}}rT_c \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \quad (34)$$

**II.4.2.5. Le rendement**

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} \quad (35)$$

d'où:

$\left\{ \begin{array}{l} W : \text{ est l'énergie fournie sous forme de travail} \\ Q_c : \text{ est l'énergie thermique échangé par chaleur} \end{array} \right.$

$$W = m_{\text{air}}r(T_c - T_f) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (36)$$

On peut considérer que l'énergie thermique échangée par chaleur  $Q_c$  n'est apportée au moteur que pendant la transformation 3-->4 et donc que  $Q_c = Q_{3-4}$

$$Q_{3-4} = m_{\text{air}}rT_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

et on a :  $V_4 = V_1$  et  $V_3 = V_2$  donc

$$Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

Notre rendement devient :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (37)$$

Selon la formule au-dessous, le rendement peut s'écrire en fonction des températures chaudes et froides :

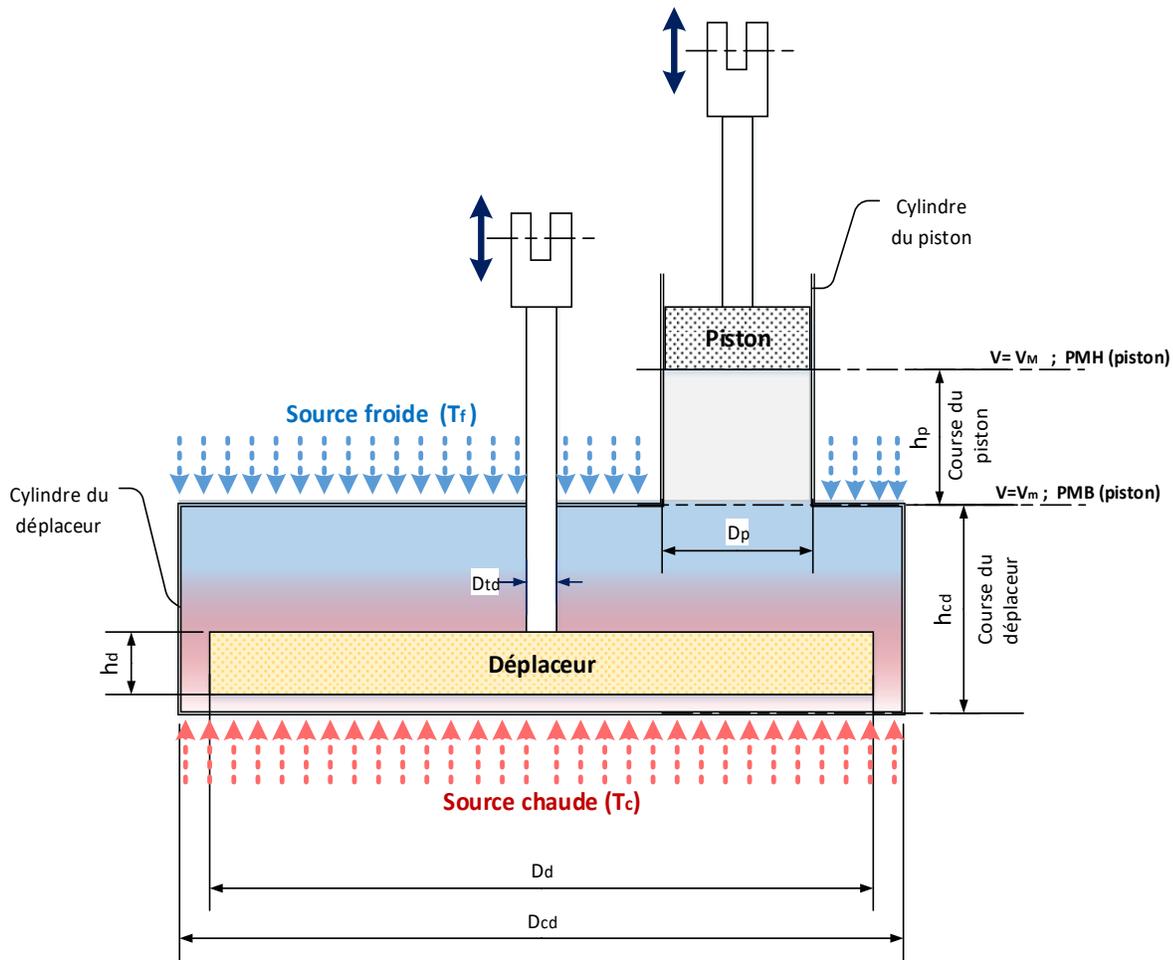
$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

**Remarque :** on voit que le rendement théorique du moteur Stirling égale au rendement théorique de Carnot

Donc en réalité le rendement réel du moteur Stirling ne doit pas dépasser la valeur qu'on va trouver dans les calculs.

## II.5. Etude et dimensionnement

Dans cette partie on s'intéresse à l'étude et le calcul des paramètres caractéristiques principaux du modèle choisis du moteur Stirling, à partir des données initiales géométrique et thermiques telle que : les dimensions des cylindres, pistons de travail et déplaceur, la température source chaude et froide.[15] (Voir Tableau N° 1)



*Figure II.8 : Schémas représentatif de la dimension principale pour l'étude thermodynamique d'un moteur Stirling type Gamma.[12]*

### II.5.1. Définitions des démentions

#### ○ Cylindre de déplaceur

- $D_{cyl}$  : Diamètre intérieur du cylindre du déplaceur (grand cylindre).
- $h_{cyl}$  : Hauteur du cylindre du déplaceur (grand cylindre) = course de déplaceur.
- $D_d$  : Diametre du déplaceur.
- $h_d$  : Hauteur du déplaceur.
- $D_{td}$  : Diamètre de la tige du déplaceur.

#### ○ Cylindre du piston de travail

- $D_p$  : Diamètre du cylindre du piston de travail (petit cylindre) = Diamètre extérieur du piston.
- $h_p$  : Hauteur du cylindre du piston (grand cylindre) = course du déplaceur.

### II.5.2. Dimension et paramètre de calcul

Afin d'effectuer une étude énergétique détaillée du moteur Stirling type gamma et d'évaluer les paramètres caractéristiques de notre modèle variante (a), on a pris les dimensions géométriques et les paramètres thermiques suivantes :

Désignations	Symboles	Unités	Valeurs
Paramètres géométriques :			
Diamètre intérieur du grand cylindre	$D_{gc}$	[mm]	159
Hauteur du grand cylindre	$h_{cyl}$	[mm]	70
Diamètre du déplaceur	$D_d$	[mm]	153
Hauteur du déplaceur	$h_d$	[mm]	20
Diamètre de la tige du déplaceur	$D_{td}$	[mm]	6
Hauteur de la tige du déplaceur	$h_{td}$	[mm]	50
Diamètre intérieur du petit cylindre	$D_{pc}$	[mm]	45
Hauteur du petit cylindre	$h_{pc}$	[mm]	60
Diamètre du piston de travail	$D_p$	[mm]	44
Hauteur du piston de travail	$h_p$	[mm]	20
Paramètres thermiques :			
Température de la source chaude	$T_c$	[K]	573
Température de la source froide	$T_f$	[K]	303

**Tableau N°1 : Paramètres géométriques et thermiques.**

### II.5.3. Calcul théorique du cycle de Stirling de la configuration proposée

Dans ce cas, nous allons calculer les pressions, les volumes, le travail, la chaleur et le rendement. Pour cet exemple, les paramètres initiaux de notre moteur sont représentés dans le tableau ci-dessus.

#### a) Calcul des volumes $V_{\max}$ et $V_{\min}$

##### ➤ Le volume Maximal $V_{\max}$ :

C'est le volume total de l'air emprisonné dans le cylindre du déplaceur plus le volume du cylindre du piston lorsque ce dernier se trouve au point mort haut PMH c.-à-d.

$$V_{\max} = V_{gc} + V_{pc}$$

On doit calculer:

##### ➤ Volume de l'air emprisonné dans le grand cylindre $V_{gc}$

Ce volume est égal au volume du cylindre  $V_{cyl}$  moins le volume du déplaceur  $V_d$  et le volume de la tige du déplaceur  $V_{td}$ .

$$V_{gc} = V_{cyl} - V_d - V_{td}$$

Tout d'abord on doit calculer :

- Volume de grand cylindre sans déplaceur  $V_{cyl}$

$$V_{cyl} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl}$$

AN :

$$V_{\text{cyl}} = 3,14 \times \left(\frac{0,159}{2}\right)^2 \times 0,07$$

$$V_{\text{cyl}} = 1,389 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

- Volume de déplaceur  $V_d$

$$V_d = \pi \left(\frac{D_d}{2}\right)^2 \cdot h_d$$

AN :

$$V_d = 3,14 \times \left(\frac{0,153}{2}\right)^2 \times 0,02$$

$$V_d = 3,677 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

- Volume de la tige du déplaceur  $V_{td}$

$$V_{td} = \pi \left(\frac{D_{td}}{2}\right)^2 (h_{\text{cyl}} - h_d)$$

AN :

$$V_{td} = 3,14 \times \left(\frac{0,006}{2}\right)^2 \times (0,07 - 0,02)$$

$$V_{td} = 1,414 \times 10^{-6} \text{m}^3$$

Donc l'expression du volume  $V_{gc}$  sera :

$$V_{gc} = \pi \left(\frac{D_{\text{cyl}}}{2}\right)^2 \cdot h_{\text{cyl}} - \pi \left(\frac{D_d}{2}\right)^2 \cdot h_d - \pi \left(\frac{D_{td}}{2}\right)^2 (h_{gc} - h_d)$$

AN:

$$V_{gc} = (1,389 \times 10^{-3}) - (3,677 \times 10^{-4}) - (1,414 \times 10^{-6})$$

$$V_{gc} = 1,020 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

➤ Le volume de petit cylindre du piston de travail  $V_{pc}$

$$V_{pc} = \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p)$$

AN :

$$V_{pc} = 3,14 \times \left( \frac{0,045}{2} \right)^2 \times (0,06 - 0,02)$$

$$V_{pc} = 6,362 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Donc l'expression du volume  $V_{max}$  sera :

$$V_{max} = \frac{\pi}{4} \left[ (D_{cyl})^2 \cdot h_{cyl} - (D_d)^2 \cdot h_d - (D_{td})^2 (h_{cyl} - h_d) \right] + \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p)$$

AN :

$$V_{max} = 1,020 \times 10^{-3} + 6,362 \times 10^{-5}$$

$$V_{max} = 1,085 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

➤ Le volume minimal  $V_{min}$

Ce volume est égal au volume du cylindre  $V_{cyl}$  moins le volume du déplaceur  $V_d$ .

$$V_{min} = V_{cyl} - V_d$$

$$V_{min} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d$$

$$V_{\min} = (1,389 \times 10^{-3}) - (3,677 \times 10^{-4})$$

$$V_{\min} = 1,0213 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Désignation	Symbole	Unité	Valeurs
Paramètres géométriques calculés :			
Volume du cylindre(sans déplaceur)	$V_{cyl}$	$m^3$	$1,389 \times 10^{-3}$
Volume du déplaceur	$V_d$	$m^3$	$3,677 \times 10^{-4}$
Volume du petit cylindre	$V_{pc}$	$m^3$	$6,362 \times 10^{-5}$
Volume du grand cylindre (avec déplaceur)	$V_{min}$	$m^3$	$1,0213 \times 10^{-3}$
Volume maximal	$V_{max}$	$m^3$	$1,085 \times 10^{-3}$

**Tableau N°2** : Tableau récapitulatif des volumes

### b) Calcul des pressions dans chaque point de cycle

On considère que l'air emprisonné dans les cylindres comme un gaz parfait

➤ 1→2: Compression isotherm ( $V_1=V_{\max}, T_1 = T_2 = T_f$ )

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} r T_1$$

Il faut calculer d'abord la masse de l'air :

Avec :

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V$$

On sait que la masse volumique de l'air dépend de la température dans notre cas. Source Froide  
:  $T_f = 30^\circ\text{C}$  sa masse volumique  $\rho_{\text{air}} = 1.164 \text{ kg/m}^3$

Donc :

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V_{\max}$$

AN:

$$m_{\text{air}} = 1,164 \times 1,085 \times 10^{-3}$$

$$m_{\text{air}} = 1,263 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} r T_1$$

Donc :

$$P_1 = \frac{m_{\text{air}} r T_1}{V_1}$$

AN :

$$P_1 = \frac{1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303}{1,085 \times 10^{-3}}$$

$$P_1 = 1,012 \times 10^5 \text{ Pa}$$

✓ 2 → 3 : Chauffage isochore ( $V_2 = V_{\text{min}}, T_2 = T_f$ )

$$P_2 V_2 = m_{\text{air}} r T_2$$

Donc :

$$P_2 = \frac{m_{\text{air}} r T_2}{V_2}$$

AN :

$$P_2 = \frac{1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303}{1,0213 \times 10^{-3}}$$

$$P_2 = 1,075 \times 10^5 \text{ Pa}$$

➤ 3 → 4 : Détente isotherme ( $V_3 = V_{\text{min}}, T_3 = T_4 = T_c$ )

$$P_3 V_3 = m_{\text{air}} r T_3$$

Donc :

$$P_3 = \frac{m_{\text{air}} r T_3}{V_3}$$

AN :

$$P_3 = \frac{1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573}{1,0213 \times 10^{-3}}$$

$$P_3 = 2,034 \times 10^5 \text{ Pa}$$

➤ 4 → 1 : Refroidissement isochore ( $V_4 = V_{\text{max}}, T_4 = T_c$ )

$$P_4 V_4 = m_{\text{air}} r T_4$$

Donc :

$$P_4 = \frac{m_{\text{air}} r T_4}{V_4}$$

AN :

$$P_4 = \frac{1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573}{1,085 \times 10^{-3}}$$

$$P_4 = 1,914 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Etat	Pression P [Pa]	Volume V [ $m^3$ ]	Température T [K]
1	$1,012 \times 10^5$	$1,085 \times 10^{-3}$	303
2	$1,075 \times 10^5$	$1,0213 \times 10^{-3}$	303
3	$2,034 \times 10^5$	$1,0213 \times 10^{-3}$	573
4	$1,914 \times 10^5$	$1,085 \times 10^{-3}$	573

**Tableau N°3** : Tableau récapitulatif des pressions, volumes et températures

c) Calcul des quantités de chaleur ( $Q_{1-2}, Q_{2-3}, Q_{3-4}, Q_{4-1}$ )

On applique le premier principe de thermodynamique

$$\Delta U = Q + W$$

➤ Chaleur  $Q_{1-2}$ 

$$dU_{1-2} = \partial Q_{1-2} + \partial W_{1-2} = 0 \text{ (la température est constante)}$$

$$\text{Donc : } \partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = PdV$$

$$\text{or } P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V}$$

$$\text{D'où : } \partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = PdV = \frac{m_{\text{air}} r T_f}{V} dV = m_{\text{air}} r T_f \frac{dV}{V}$$

$$\text{Nous intégrons cette relation : } Q_{1-2} = m_{\text{air}} r T_f \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

AN :

$$Q_{1-2} = 1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303 \times \ln \left( \frac{1,0213 \times 10^{-3}}{1,085 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Q_{1-2} = -6,645 \text{ J}$$

➤ Chaleur  $Q_{3-4}$ 

$$\text{De même pour } Q_{3-4} \text{ on trouve : } Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_4}{V_3} \right)$$

AN :

$$Q_{3-4} = 1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573 \times \ln \left( \frac{1,085 \times 10^{-3}}{1,0213 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Q_{3-4} = 12,567 \text{ J}$$

❖ Pour  $Q_{2-3}$  et  $Q_{4-1}$  on a :  $Q_{2-3} = m_{\text{air}} C_v (T_3 - T_2)$  et  $Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_1 - T_4)$

$$Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_f - T_c)$$

L'air est assimilé à un gaz parfait, donc :  $C_v = \frac{5}{2} r$

$$\text{Alors : } Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r (T_c - T_f)$$

**AN :**

$$Q_{2-3} = 1,263 \times 10^{-3} \times \frac{5}{2} \times 287 \times (573 - 303)$$

$$Q_{2-3} = \mathbf{244,675 \text{ J}}$$

$$\text{Donc : } Q_{4-1} = -Q_{2-3}$$

$$Q_{4-1} = \mathbf{-244,675 \text{ J}}$$

**d) Calcul des travaux ( $W_{1-2}, W_{2-3}, W_{3-4}, W_{4-1}$ )**

On a:

$$\partial W_{1-2} = -\partial Q_{1-2} = -P dV$$

$$\text{or } P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V}$$

$$\text{Donc : } \partial W_{1-2} = -\frac{m_{\text{air}} r T_f}{V} dV = -m_{\text{air}} r T_m \frac{dV}{V}$$

$$\text{Nous intégrons cette relation : } W_{1-2} = -m_{\text{air}} r T_f \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

**AN :**

$$W_{1-2} = -1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303 \times \ln \left( \frac{1,0213 \times 10^{-3}}{1,085 \times 10^{-3}} \right)$$

$$W_{1-2} = \mathbf{6,645 \text{ J}}$$

$$\text{De même pour } W_{3-4} \text{ on trouve : } W_{3-4} = -m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_4}{V_3} \right)$$

AN :

$$W_{3-4} = -1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573 \times \ln\left(\frac{1.085 \times 10^{-3}}{1.0213 \times 10^{-3}}\right)$$

$$W_{3-4} = -12,567 \text{ J}$$

$$W_{2-3} \text{ et } W_{4-1} = 0 \text{ (Volume constant)}$$

e) Calcul de travail total W

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1}$$

AN :

$$W = 6,645 - 12,567$$

$$W = -5,922 \text{ J}$$

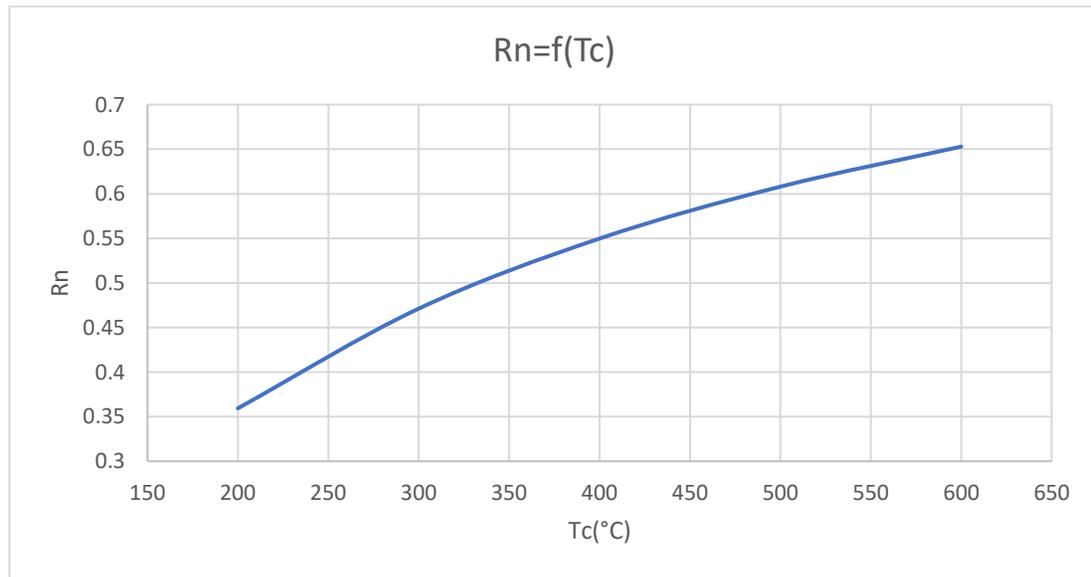
f) Calcul de rendement théorique  $\eta$

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

$$\text{AN : } \eta = 1 - \frac{303}{573} = 0.47$$

- L'influence de  $T_c$  sur le rendement théorique

On fixe la température  $T_f$  30°C et on trace la courbe  $\eta = f(T_c)$

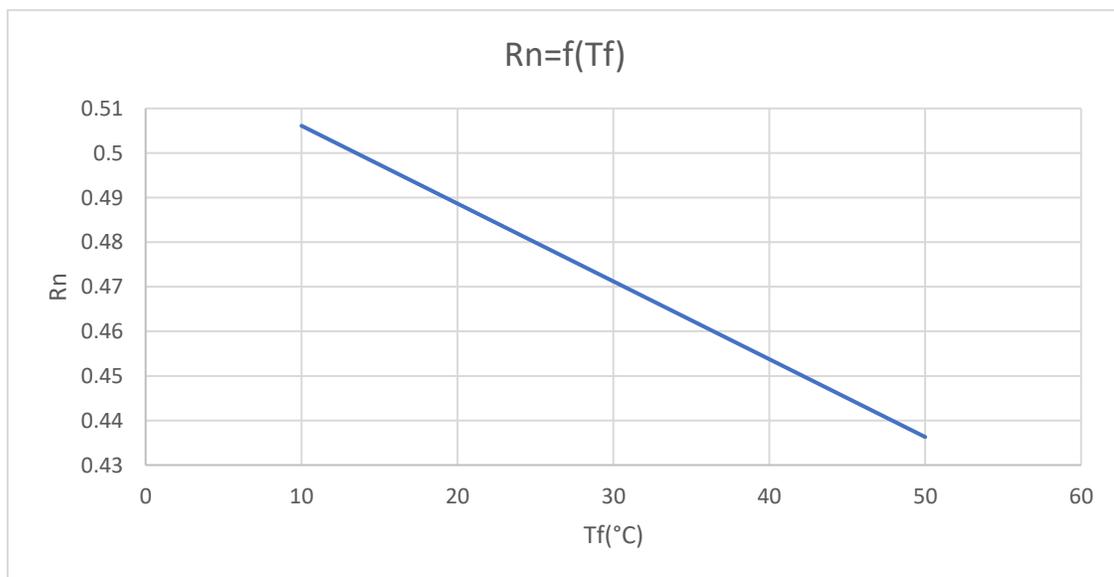


**Figure II.9 :** L'influence de  $T_c$  sur le rendement théorique

**Remarque :** on voit que plus la température chaude et grande, plus le rendement théorique est élevé

- L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique

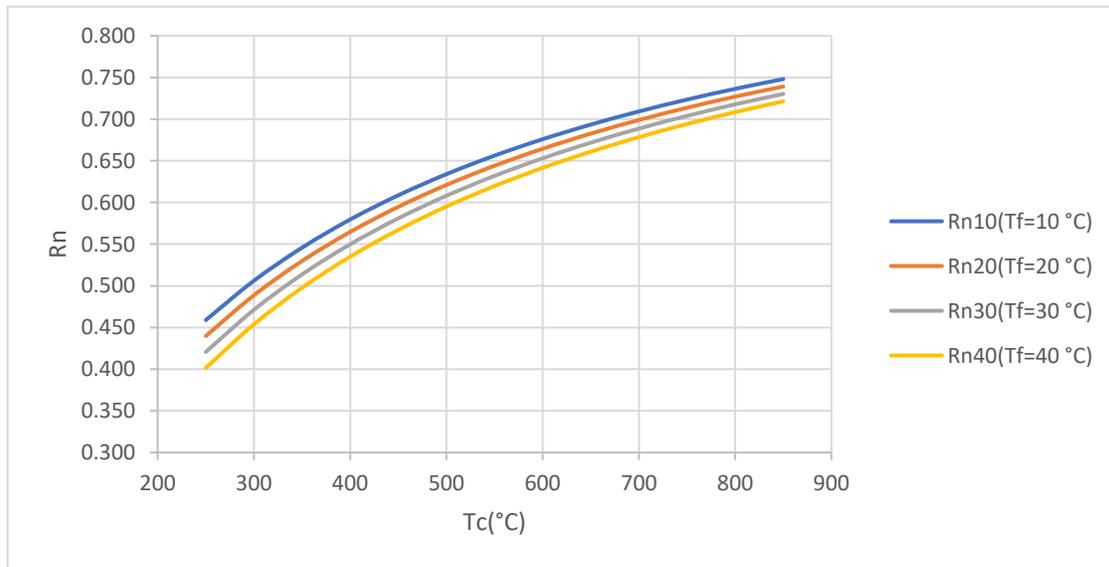
Maintenant on fixe la température  $T_c$  et on trace la courbe  $\eta = f(T_f)$



**Figure II.10 :** L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique

**Remarque :** à chaque fois la température froide diminue le rendement théorique du moteur augmente

Pour montrer bien l'influence de la température froide sur le rendement théorique, voici quelques courbes avec la même température chaude mais elles n'ont pas la même température froide



*Figure II.11 : L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique*

Etat	1→2	2→3	3→4	4→1
Température T [K]	303	303	573	573
Volume V [ m <sup>3</sup> ]	<b>1.085 × 10<sup>-3</sup></b>	<b>1.0213 × 10<sup>-3</sup></b>	<b>1.0213 × 10<sup>-3</sup></b>	<b>1.085 × 10<sup>-3</sup></b>
Pression P [Pa]	<b>1.012 × 10<sup>5</sup></b>	<b>1.075 × 10<sup>5</sup></b>	<b>2.034 × 10<sup>5</sup></b>	<b>1.914 × 10<sup>5</sup></b>
Chaleur Q [J]	<b>-6.645</b>	<b>244.675</b>	<b>12,567</b>	<b>-244.675</b>
Travail W [J]	<b>6,645</b>	<b>0</b>	<b>-12,567 J</b>	<b>0</b>

**Tableau N°4 :** Tableau récapitulatif des paramètres caractéristique des évolutions du cycle

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a choisi le type gamma de moteur Stirling en calculons les volumes, les pressions, les chaleurs, les travaux et le rendement en utilisant le cycle théorique du moteur Stirling

On a conclu que la géométrie du moteur n'a aucune influence sur le rendement théorique et que la température des parois (chaude et froide) est le seul responsable qui donne la valeur du rendement.

# CHAPITRE III

## Conception du moteur Stirling avec SOLIDWORKS

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on a procédé à une simulation numérique en utilisant le logiciel de CAO SOLIDWORKS afin de concrétiser virtuellement un exemple de moteur Stirling.

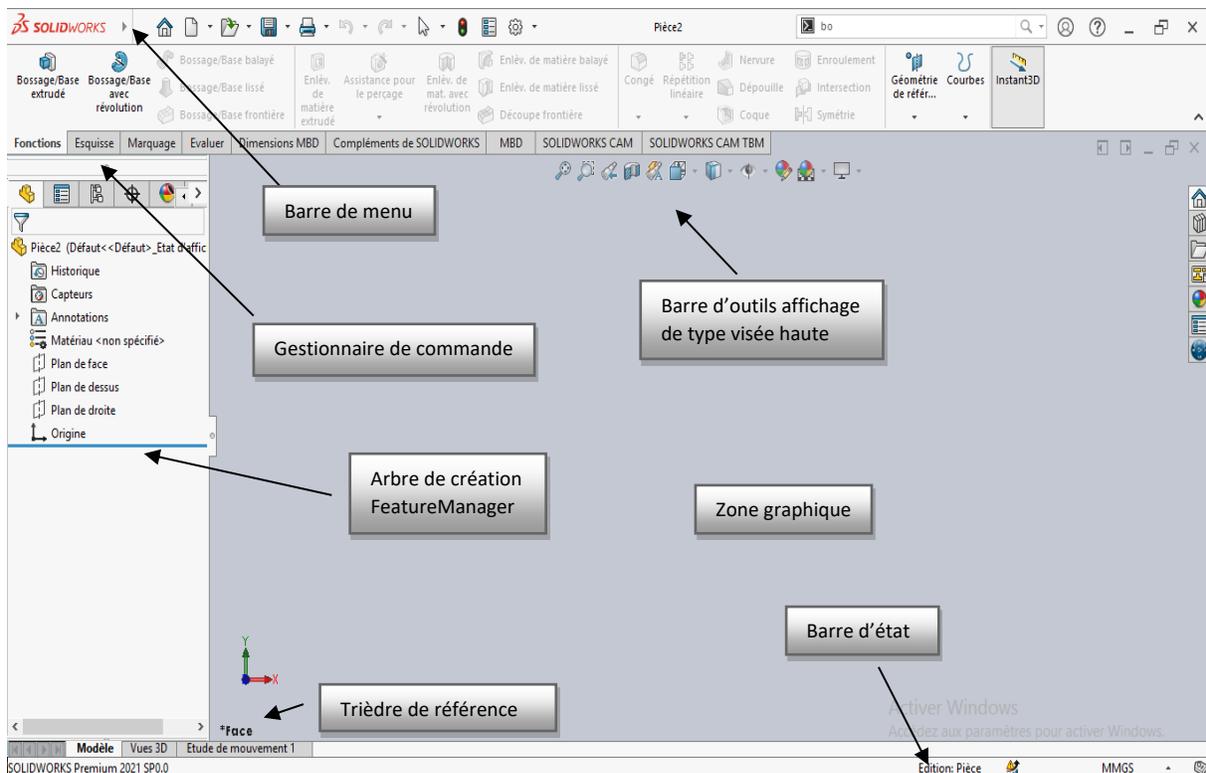
Le but de ce chapitre est la présentation des étapes suivies pour la modélisation 3D du moteur considéré et de simuler son fonctionnement et d'éviter ainsi les erreurs de fonctionnement.

### III.2. Présentation du logiciel SOLIDWORKS

Le logiciel SOLIDWORKS est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées et d'expérimenter des fonctions afin de produire des modèles et des mises en plan.

#### III.2.1. Menu principal

L'exécution du logiciel fait apparaître le menu principal présenté ci-dessous :



*Figure III.1 : Menu principal de SolidWorks.*

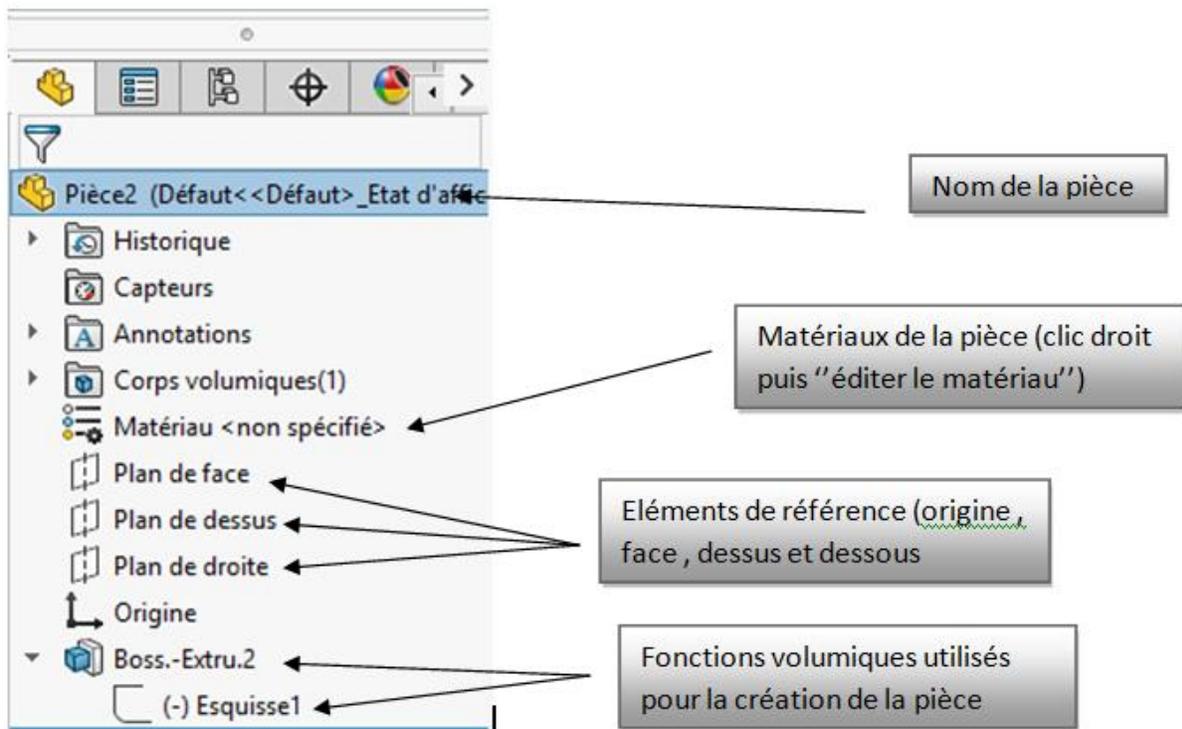
**III.2.2. Principe général**

Le principe général de création d'une pièce volumique dans SolidWorks est de partir d'une esquisse (courbe) tracée en 2D et de lui appliquer une fonction volumique (extrusion, révolution autour d'un axe, balayage, lissage...) afin de la transformer en une pièce volumique. D'autres fonctions 3D telles que (congé, coque, répétition...) permettent de modifier une géométrie.



*Figure III.2 : barre d'outils fonctions.*

Les opérations effectuées pour définir une pièce sont conservées dans l'arbre de création (partie gauche de l'interface).



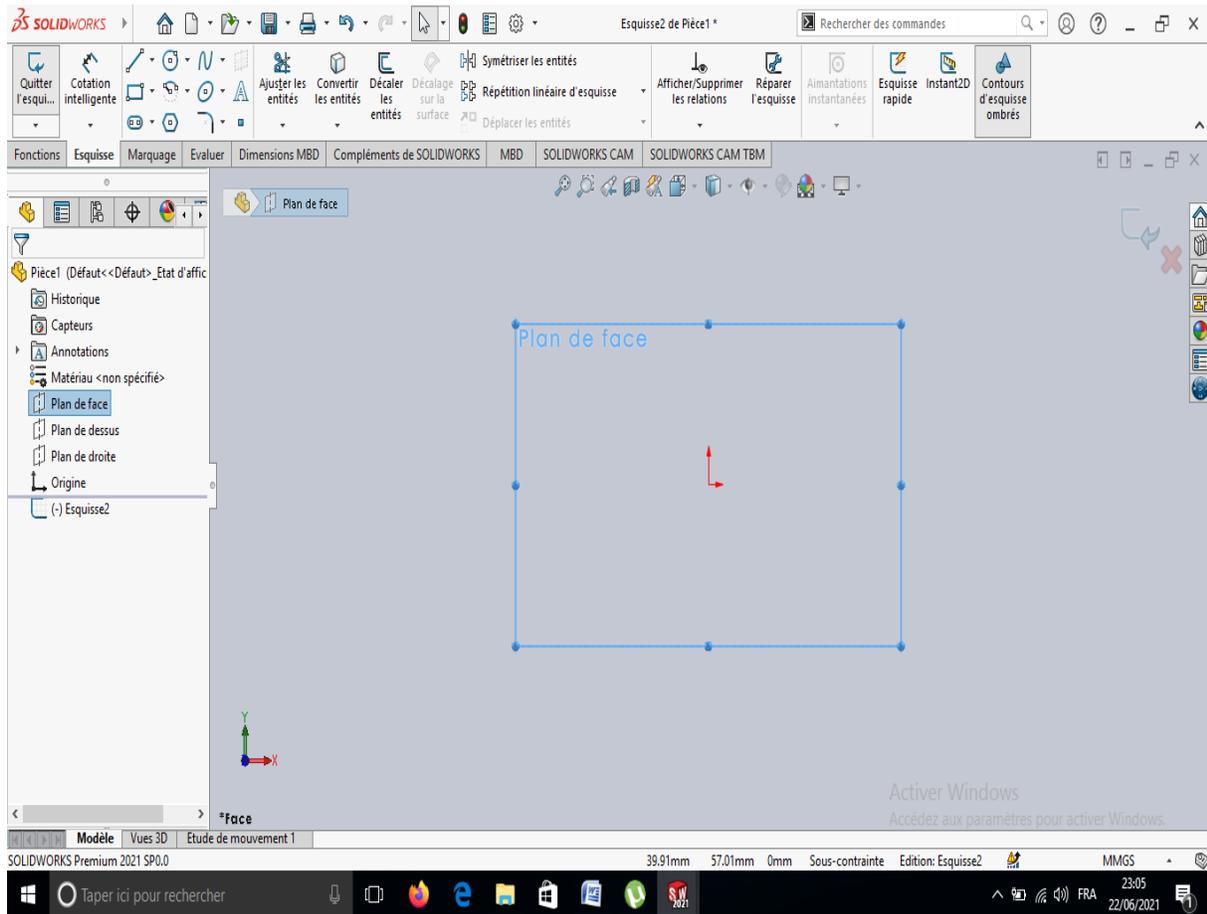
*Figure III.3 : Arbre de création de la pièce.*

On peut faire apparaître l'esquisse associée à une fonction en cliquant sur le « + » à côté du nom de cette fonction.

Les différentes fonctions et esquisses peuvent être modifiées, à tout moment, même après l'ajout de nouvelles fonctions. La mise à jour se fait soit automatiquement ou en cliquant sur la commande « reconstruire  » située à la barre de menu principale.

- **Méthode de création d'une esquisse**

- Cliquer sur l'icône nouveau «  » ;
- Sélectionner l'atelier « pièce  » puis cliquer sur « OK » ;
- Sélectionner un plan d'esquisse en faisant un clic simple sur «  Plan de face » dans l'arbre des spécifications situé à gauche de l'écran ;
- Cliquer sur l'onglet « **Esquisse** » afin d'afficher les outils d'esquisses ;
- Cliquer sur l'icône « esquisse  » pour démarrer l'esquisse sur le plan sélectionné, on aura l'esquisse présenté ci- dessous :

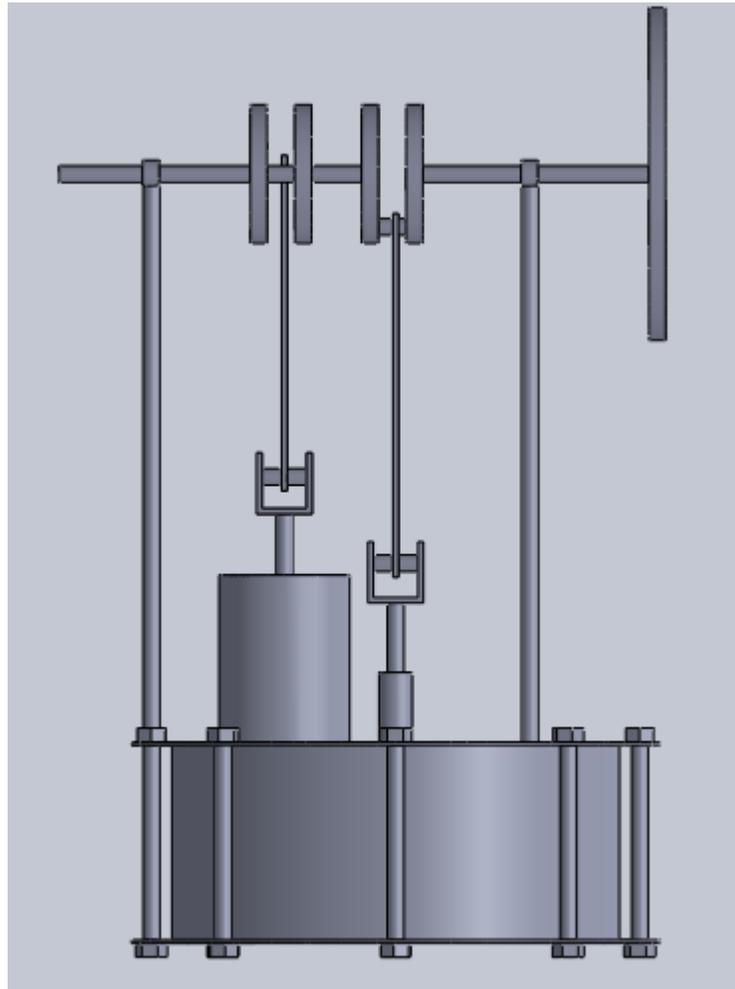


*Figure III.4 : Exemple d'une esquisse.*

### III.3. Présentation des différentes pièces de moteur Stirling

Le moteur conçu dans cette étude est composé principalement d'un grand cylindre contenant un déplaceur, d'un petit cylindre, d'un piston, d'un vilebrequin, d'un volant d'inertie et des bielles.

La mise en marche de ce moteur consiste à allumer une bougie puis de mettre en rotation, manuellement, le volant d'inertie. Cela va chasser l'air contenu dans le petit cylindre vers le grand cylindre où il subira une compression qui provoquera le déplacement du déplaceur et le cycle se répétera indéfiniment (voir la figure suivante).

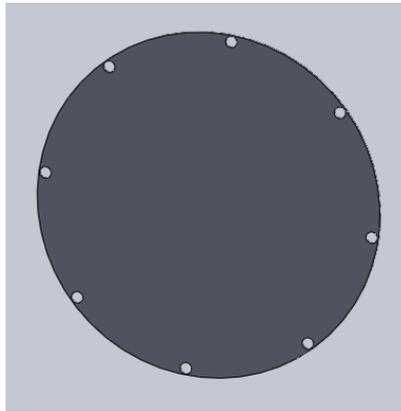


*Figure III.5: Moteur Stirling d'un type Gamma  $\gamma$ .*

Dans ce qui suit, nous allons illustrer les différentes formes des pièces conçues, leurs rôles et leurs matériaux. Les dessins de définitions de chacun de ces composants ainsi que le dessin d'ensemble seront présentés en annexe.

### III.3.1. Plaque inférieure du grand cylindre

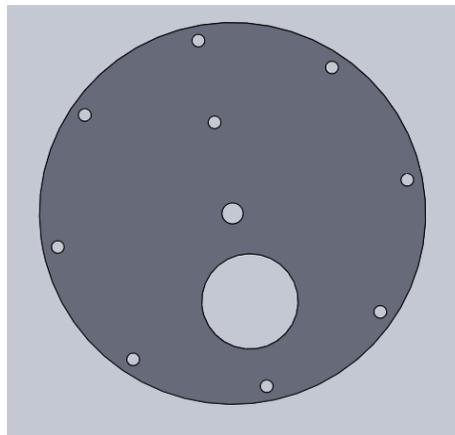
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Forme la base du grand Cylindre. Elle reçoit l'énergie de la Source chaude (à la température  $T_c$ ).



*Figure III.6 : Plaque inférieure de moteur Stirling.*

### III.3.2. La plaque supérieure de grand cylindre

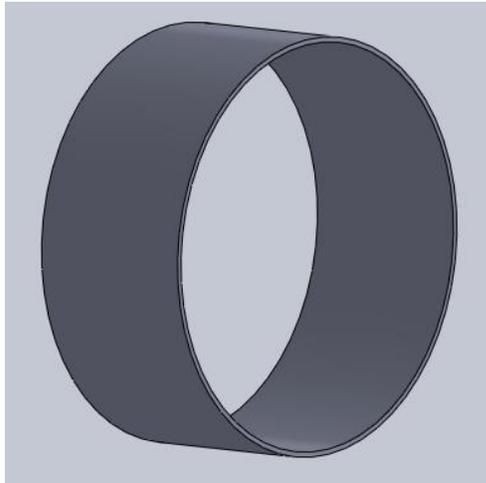
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Forme le plafond du grand cylindre et permet l'accès de l'air au petit cylindre. Elle permet l'échange de chaleur avec la source froide (à la température  $T_f$ ).



*Figure III.7 : Plaque supérieure de grand cylindre.*

### III.3.3. Grand cylindre

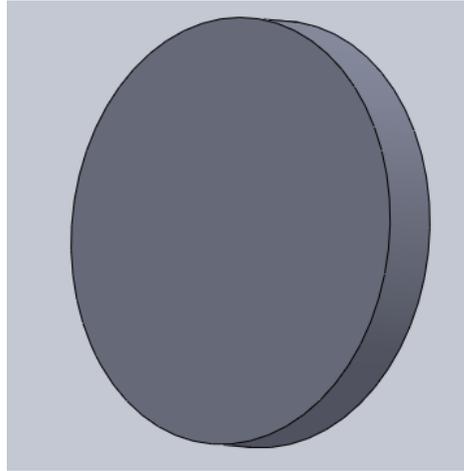
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Il assure le guidage du déplaceur, la compression et le déplacement de l'air entre les deux sources chaude/Froide.



*Figure III.8 : Grand cylindre.*

### III.3.4. Déplaceur

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Bois
- **Rôle** : Crée le mouvement de translation dû à la compression de l'air et permet son déplacement entre les deux sources chaude/Froide.



*Figure III.9 : Déplaceur.*

### III.3.5. Tige du déplaceur

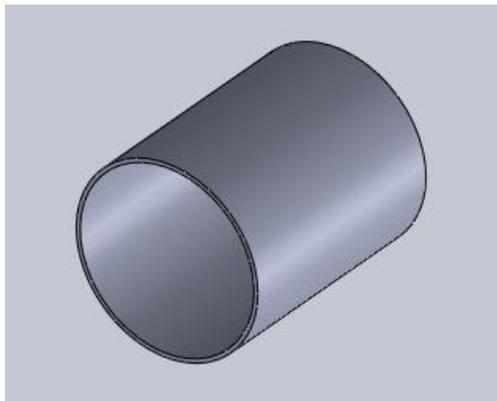
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier;
- **Rôle** : C'est de fixer le déplaceur à la bielle via un chapeau.



*Figure III.10 : Tige de déplaceur.*

**III.3.6. Petit cylindre (Cylindre de travail)**

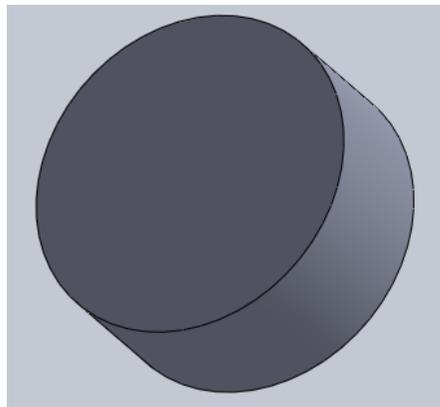
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Aluminium
- **Rôle** : assure le guidage du piston, la compression et le déplacement de l'air entre les deux sources chaude/Froide.



*Figure III.11 : Petit cylindre.*

**III.3.7. Piston**

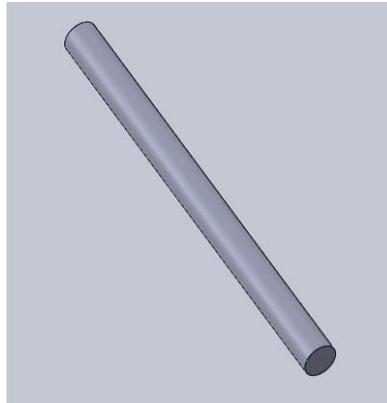
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Bois
- **Rôle** : Crée le mouvement de translation dû à la compression de l'air. Responsable à la création du travail mécanique.



*Figure III.12 : Piston.*

**III.3.8. Tige de piston**

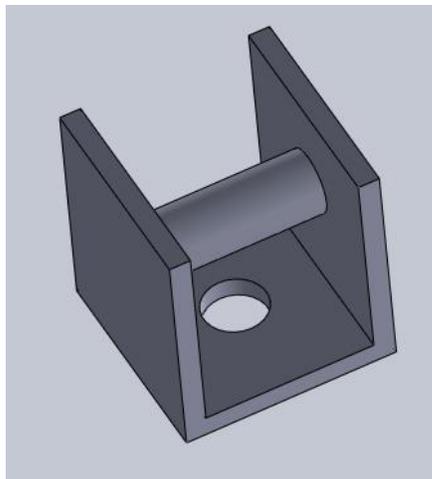
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : C'est de fixer le déplaceur à la bielle via un chapeau



**Figure III.13** : Tige de piston.

**III.3.9. Le chapeau**

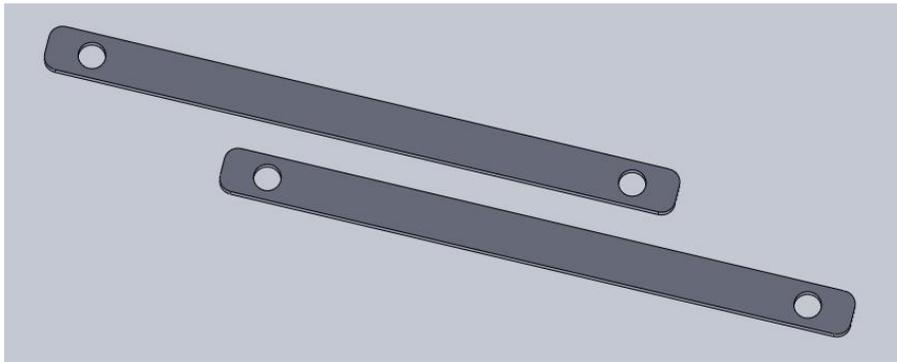
- **Nombre** : 2
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : la liaison entre la bielle et la tige pour le piston ou le déplaceur.



**Figure III.14** : Chapeau.

### III.3.10. Les bielles

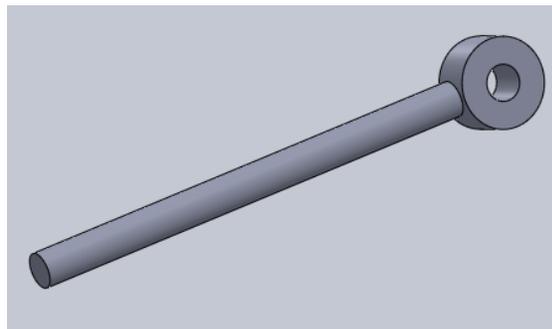
- **Nombre** : 2
- **Matière** : Aluminium,
- **Rôle** : transforme le mouvement de translation du déplaceur/piston en un mouvement de rotation du volant d'inertie.



*Figure III.15 : Les bielles.*

### III.3.11. Le support du vilebrequin

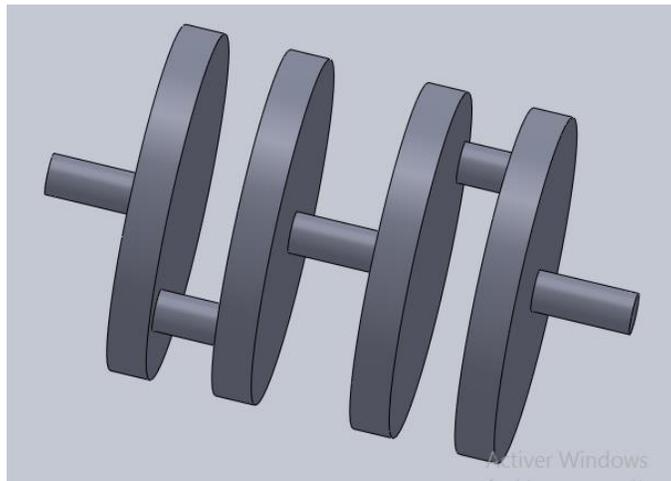
- **Nombre** : 2
- **Matière** : Acier ;
- **Rôle** : Fixer le vilebrequin à la hauteur souhaitée



*Figure III.16 : Support.*

**III.3.12. Vilebrequin**

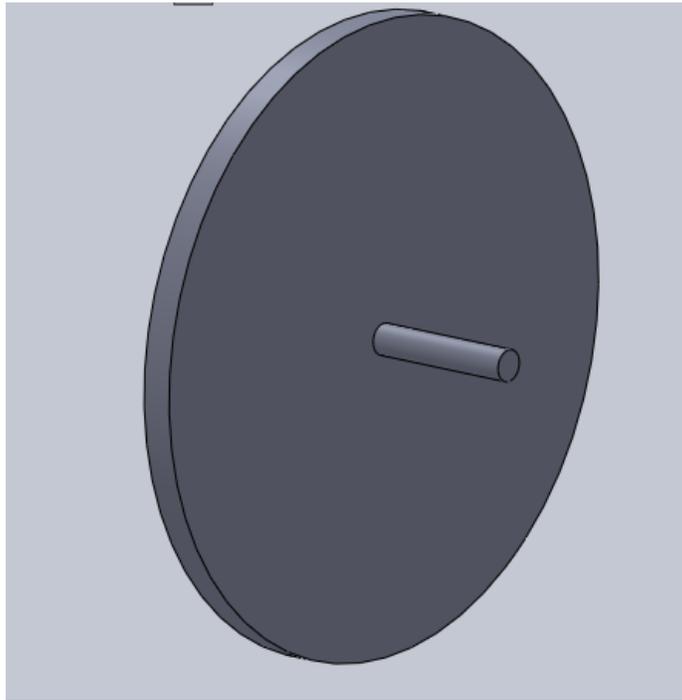
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Bois et Acier
- **Rôle** : transmettre le mouvement de translation du déplaceur au piston



*Figure III.17 : Vilebrequin.*

**III.3.13. Volant d'inertie**

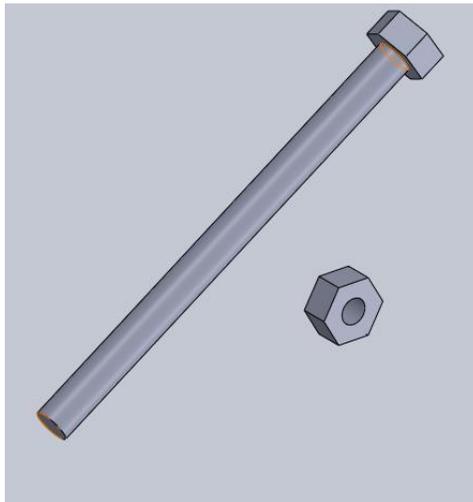
- **Nombre** : 1
- **Matière** : Aluminum
- **Rôle** : à un mouvement rotationnel, assure le fonctionnement du moteur



*Figure III.18 : Volant d'inertie.*

#### III.3.14. Boulons

- **Nombre** : 8
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : est de fixer ou serrer les pièces entre eux.



*Figure III.19 : Boulons.*

### III.4. Tableau des pièces

Pièces	Nom de pièces	Matière	Quantité
1	Plaque inferieur	Acier	1
2	Plaque supérieur	Acier	1
3	Grand cylindre	Acier	1
4	Déplaceur	Bois	1
5	Tige de déplaceur	Acier	1
6	Petit cylindre	Aluminium	1
7	Piston	Bois	1
8	Tige de piston	Acier	1
9	Chapeau	Acier	2
10	Bielle	Aluminium	2
11	Support	Acier	2
12	Vilebrequin	Bois et Acier	1
13	Volant d'inertie	Aluminium	1
14	Boulon	Acier	8

**Tableau N°5.** Tableau des pièces

### III.5. Assemblage des composants

En assemblant tous les composants suscités, on obtient le moteur présenté dans (la figure III.5) Cet assemblage nous a permis de déterminer les dimensions des bielles et d'effectuer des essais virtuels pour s'assurer du bon fonctionnement du mécanisme.

### III.6. Conclusion

A travers de ce chapitre, on a présenté brièvement le logiciel de création SolidWorks, aussi les étapes de conception du moteur Stirling gamma par ce dernier.

# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

---

### **Conclusion générale**

Le moteur Stirling est un moteur dont la conception s'avère complexe mais dont l'étude s'avère riche : théoriquement l'un des moteurs possédant le rendement le plus élevé, ses défauts le rendent complexe d'utilisation dans certains domaines, notamment lorsqu'on le compare aux moteurs à explosion. Mais ses atouts (utilisable avec n'importe quelle source d'énergie, peu bruyant, pompe à chaleur, etc.) font du Stirling un moteur portant de grandes ambitions : aujourd'hui, les enjeux énergétiques sont l'une des plus grandes questions de l'humanité, et les moteurs type explosion sont remis en cause, dus à leur forte production de gaz à effet de serre. Le moteur Stirling quant à lui, n'a pas ce problème, et pourrait être important pour les générations futures quant à la production d'énergie propre.

Une bonne compréhension du cycle thermodynamique d'un moteur Stirling permet de repérer les éléments importants pour optimiser ses performances comme maximiser la différence de température ou diminuer, mais pas trop, le volume mort. Cela permet également d'estimer la puissance du moteur ainsi que ses besoins en chaleur.

Enfin, le moteur Stirling présente une réelle opportunité dans la crise énergétique et environnementale que nous vivons malgré les améliorations qui sont encore nécessaires.

# Bibliographie



- [1]. Mémoire de master du thème « ETUDE DU CONCENTRATEUR PARABOLIQUE A MOTEUR STIRLING » soutenu par Jeddi Maroua en 2017.
- [2]. Armond, Victor, Dimensionnement et fabrication d'un moteur Stirling, France, 2019.
- [3]. Mémoire de master du thème « MOTEUR STIRLING » soutenu par Abdelilah Abid, Mimoun Bouimajjane et Khaoula Boumesmar en Mai 2018.
- [4]. Mémoire de master du thème « Etude D'un Moteur à AIR Chaud (Stirling), Application à La Conversion De L'énergie Théorique Solaire » soutenu par MAAMRI Walid en 2013.
- [5]. Mémoire de master du thème « ETUDE STATIQUE D'UN MOTEUR MODELE STIRLING », soutenu par RAKOTOMALALA Andrianiaina Julio Clark en septembre 2018.
- [6]. B. CHAKROUN, « Conception et fabrication d'un moteur Stirling type alfa en aluminium », 2010.
- [7]. Maier C., Gil A., Aguilera R., Shuang L., Yu X., Stirling engine, *Gävle, Suède* (2007).
- [8]. Mémoire de master du thème « Etude et réalisation d'un moteur Stirling couplé à un concentrateur solaire » soutenu par NOURENE Cherif et AMMAR Abdellatif en 2015.
- [9]. Sauzade D., Imbert G., Mollard J., The supporting technologies and sea trials of a long-range autonomous civilian submarine, *Marine Technology Society Journal*, 25, No. 2, 3-13 (1991).
- [10]. Mémoire de master du thème « Le moteur Stirling et ses applications », soutenu par BEKRAOUI Amina et CHABANI Asma en décembre 2012.
- [11]. Lanzetta F., Étude des transferts de chaleur instationnaires au sein d'une machine frigorifique de Stirling, *Thèse de Doctorat, Université de Franche Comte, France* (1997).
- [12]. Mémoire de master du thème « Etude et conception d'un moteur Stirling » soutenu par Habet Yacine Et Boudour Abdelghani en 2019.
- [13]. Boucher J., Moteur Stirling : application pour un drone, *Rapport de Master, Université de Franche-Comté* (2002).

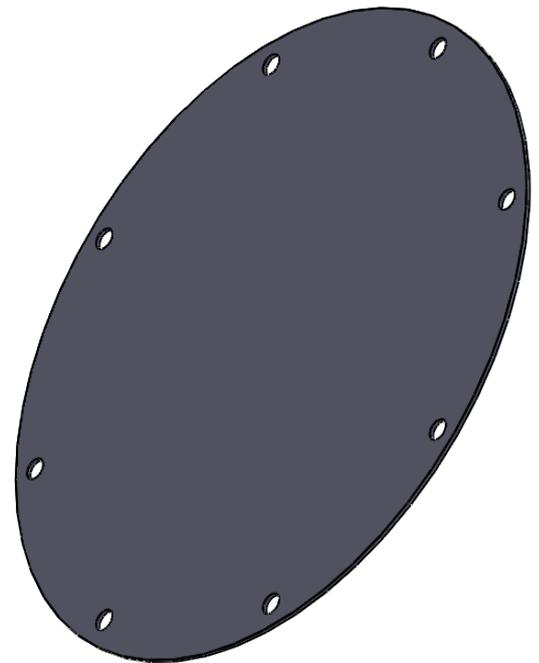
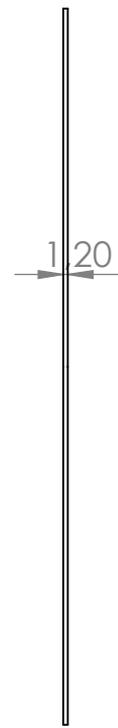
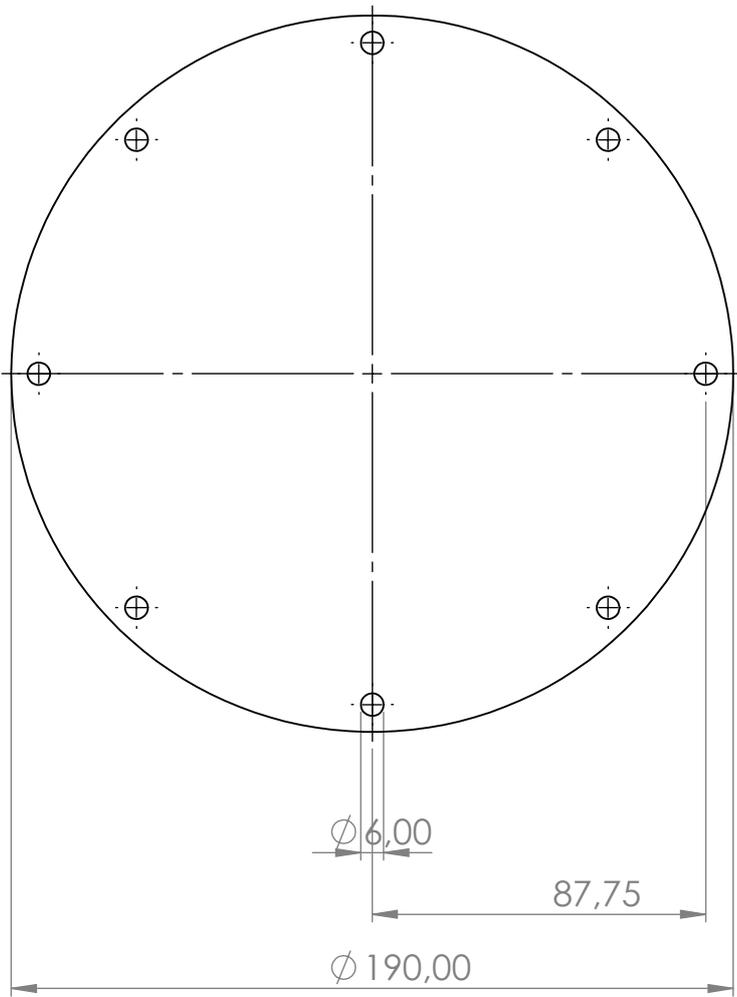
[14]. CHATENET Alexis | Master MEEF 2e degré | Mémoire ESPE | 2015 “Capacité thermique massique.”

[15]. Institut National des Sciences Appliquées « Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2008 », page 16, réalisé par Tayeb M. Marouane B.

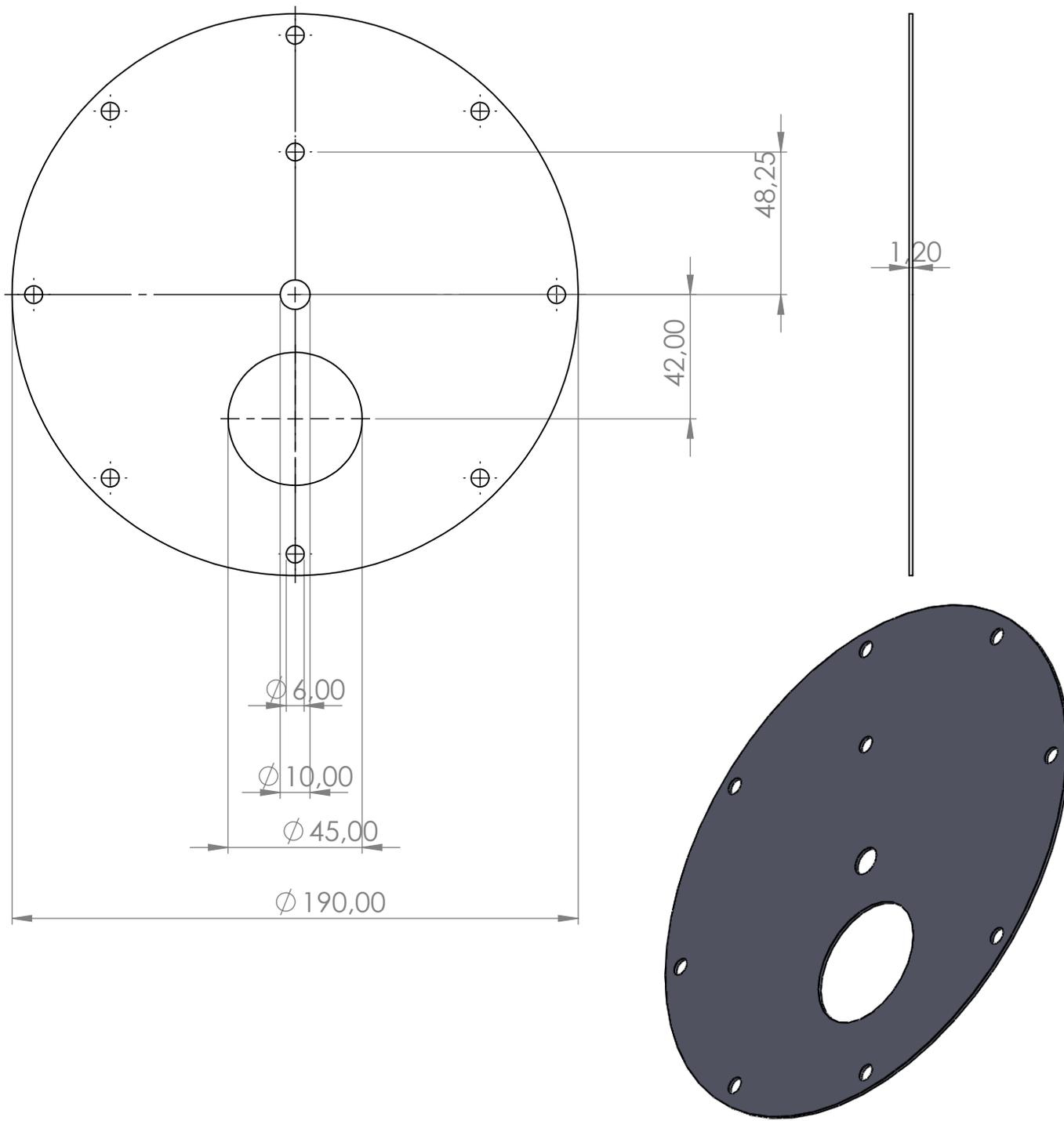
# ANNEXES



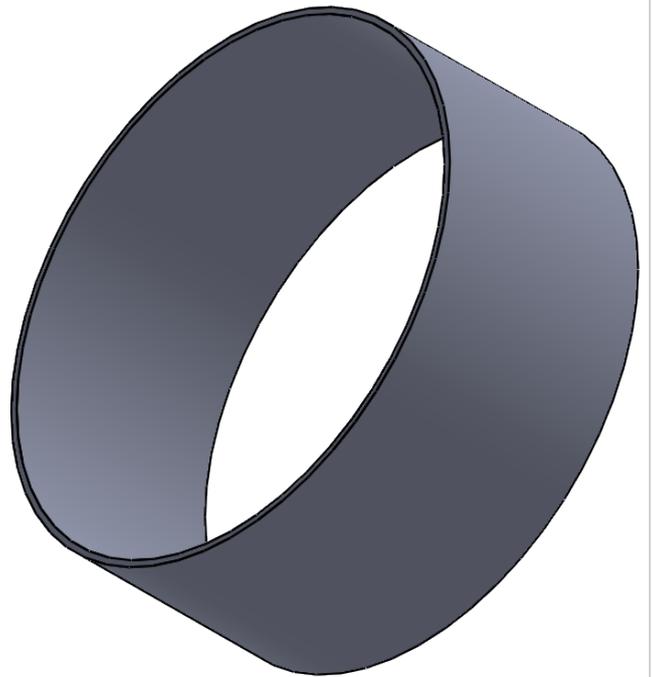
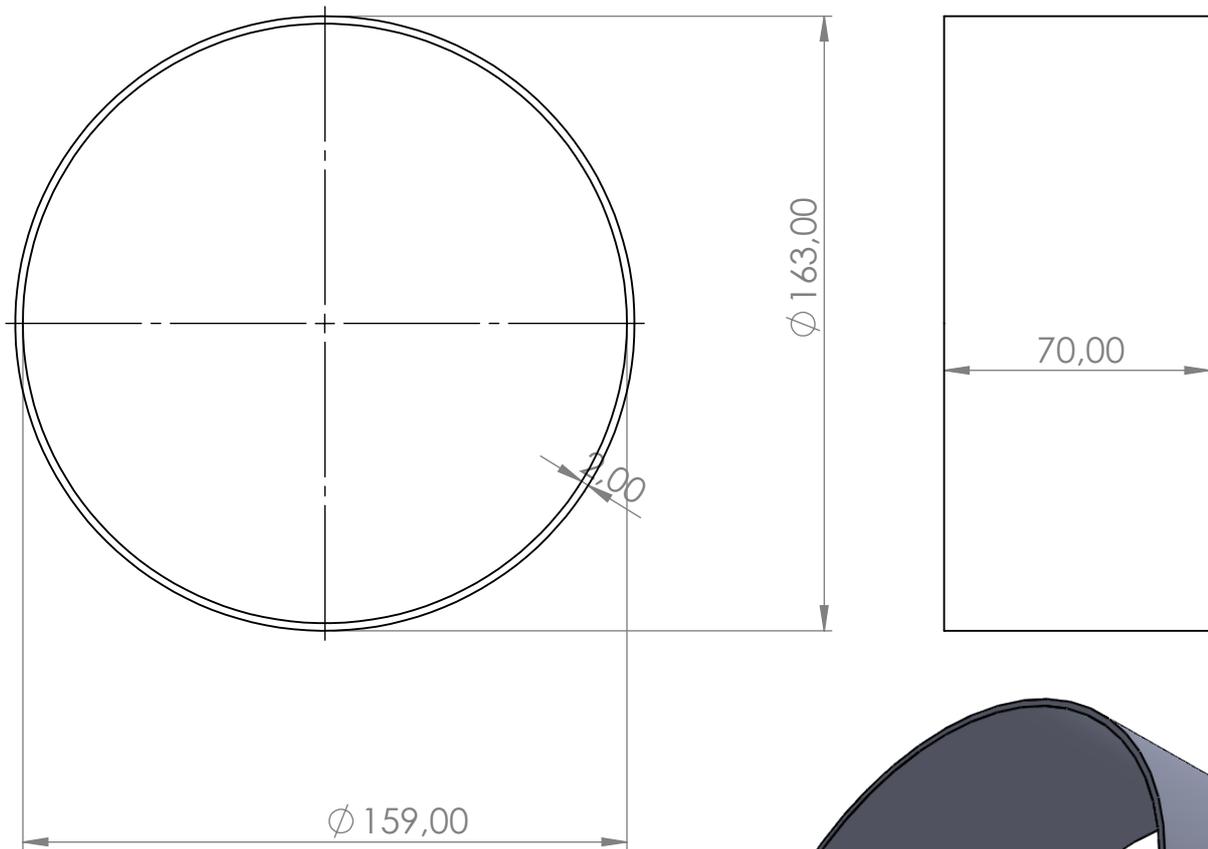
**ANNEXES 1**  
**DESSIN TECHNIQUE DES**  
**PIECES DE REALISATION**



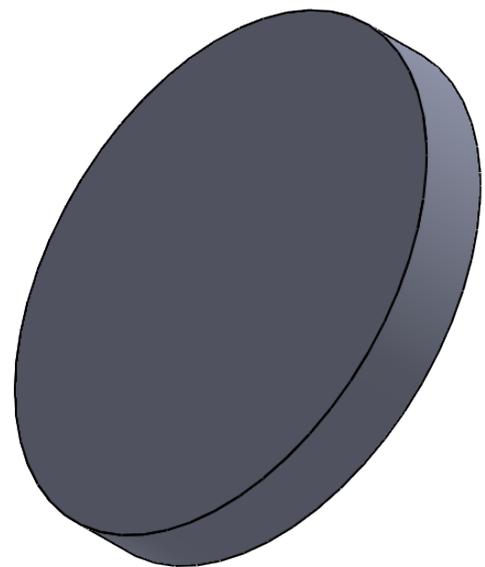
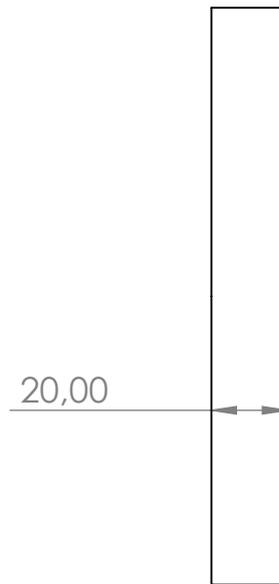
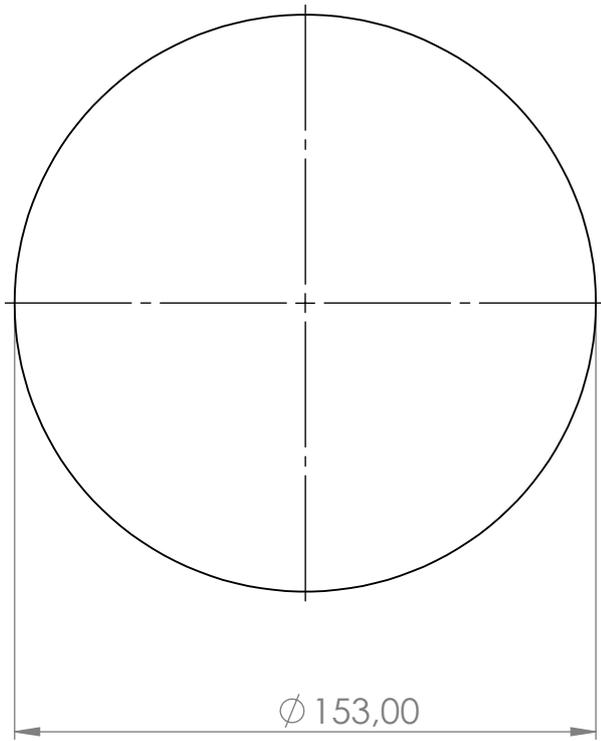
A4	Plaque inferieur	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/3		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



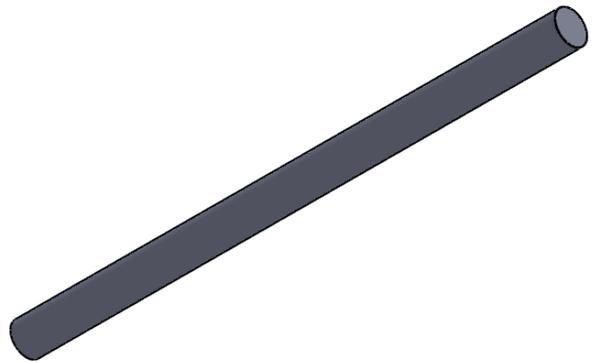
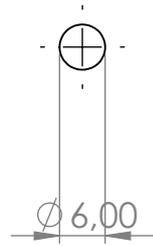
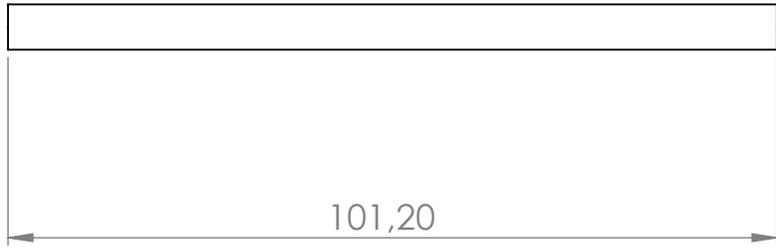
A4	Plaque superieur	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/3		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4	Grand cylindre	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4	Déplaceur	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4

Echelle : 1/1

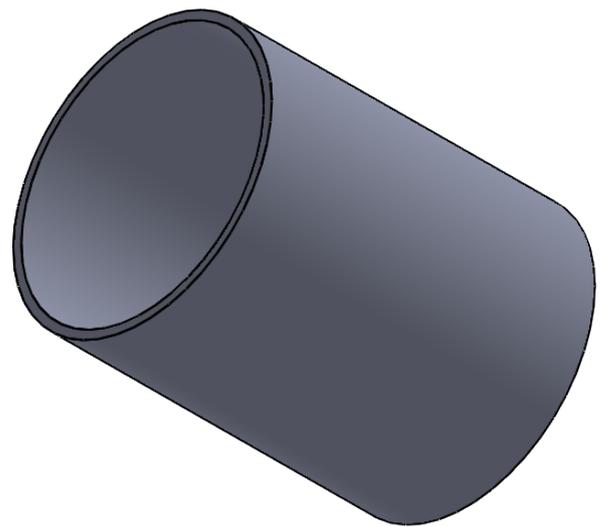
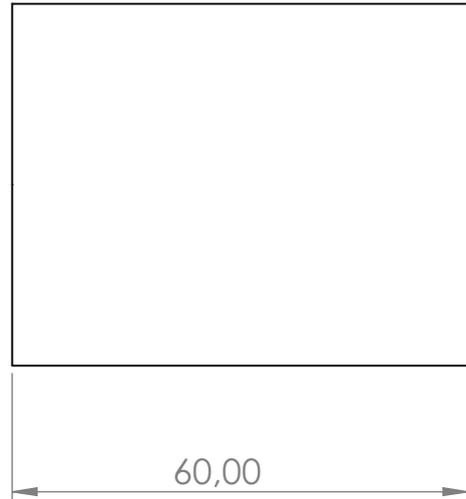
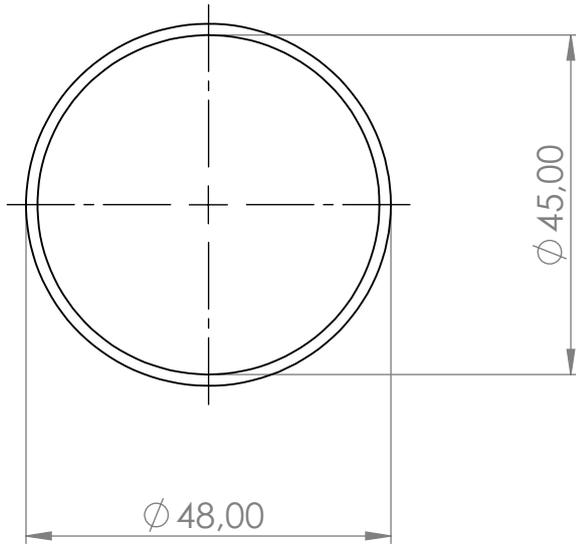
Tige de déplaceur

Sahraoui Younes  
Azizi Amine



Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira

01/07/2021



A4

Echelle : 1/1

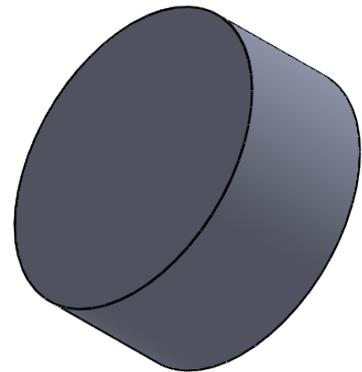
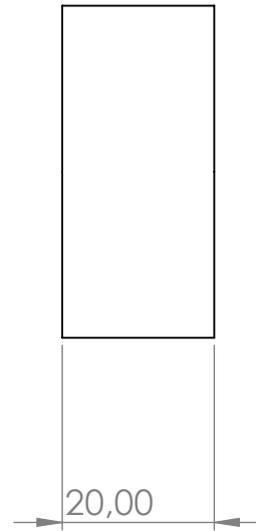
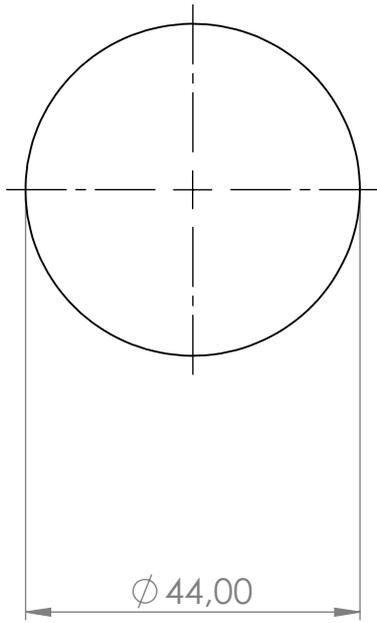
Petit cylindre

Sahraoui Younes  
Azizi Amine

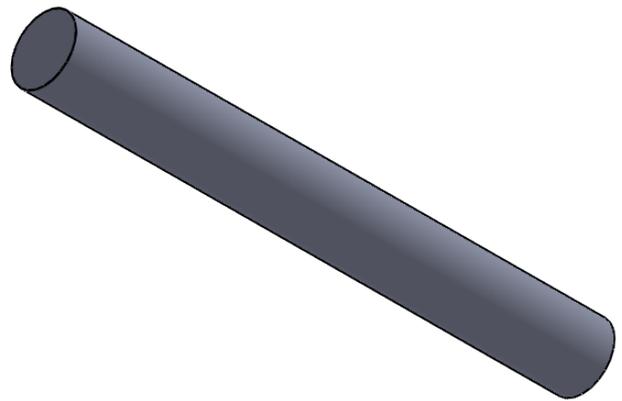
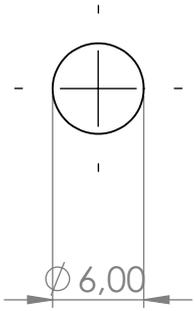


Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira

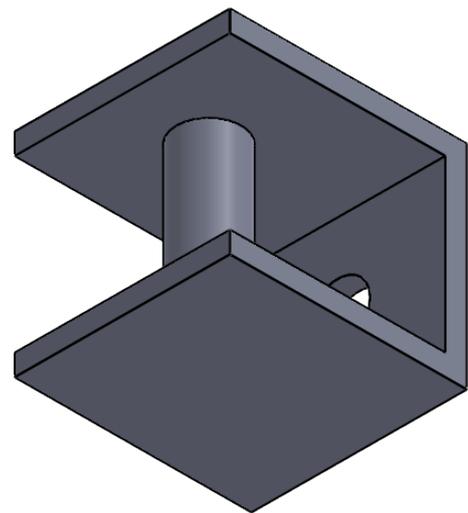
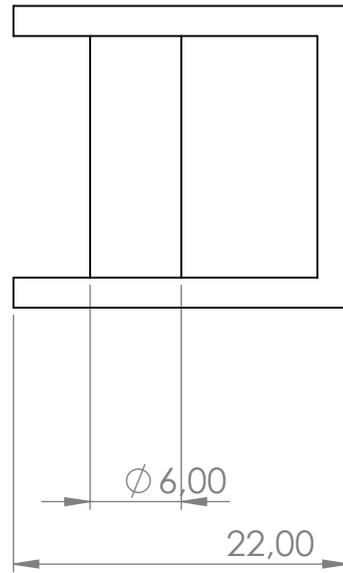
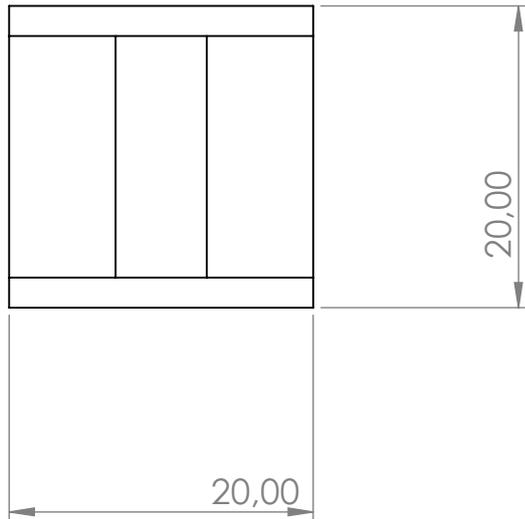
01/07/2021



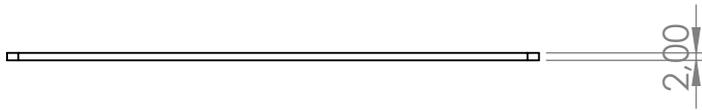
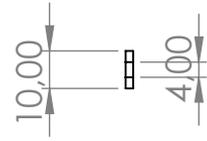
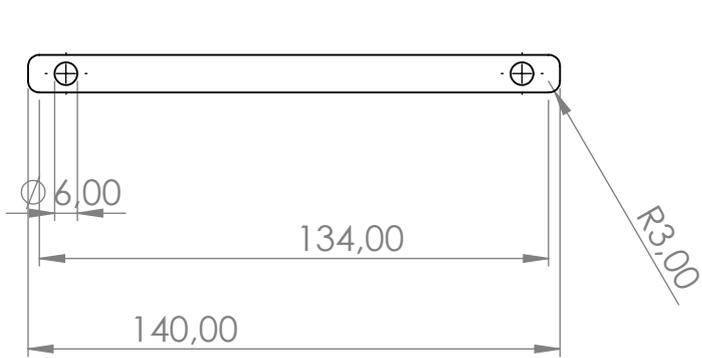
A4	Piston	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/1		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



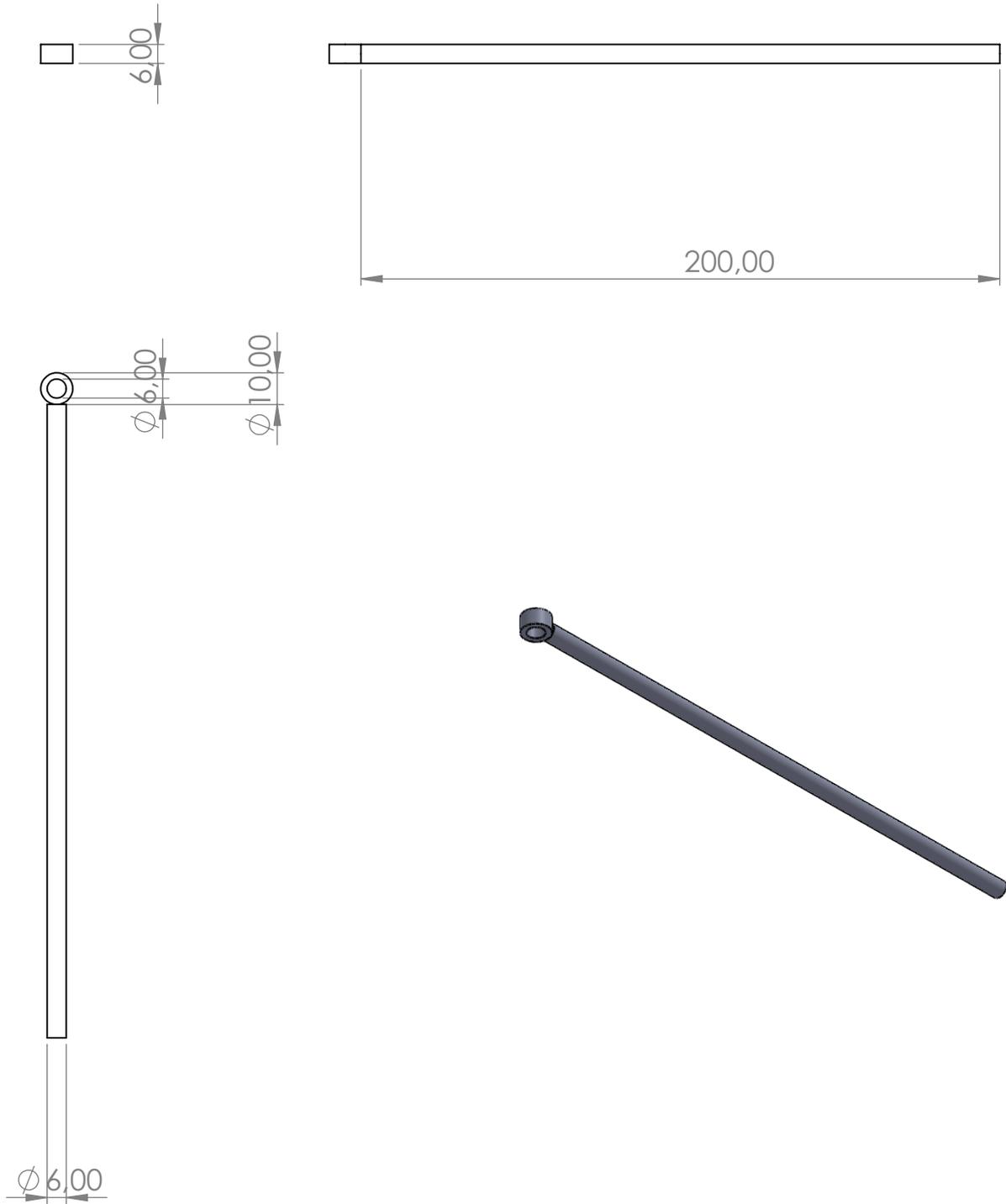
A4	Tige de piston	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 2/1		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



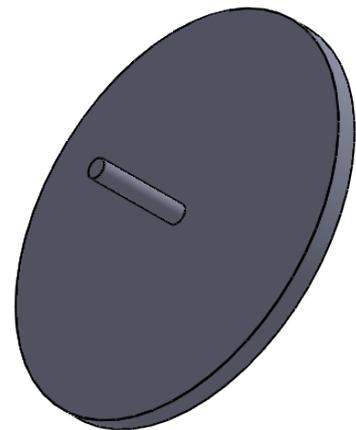
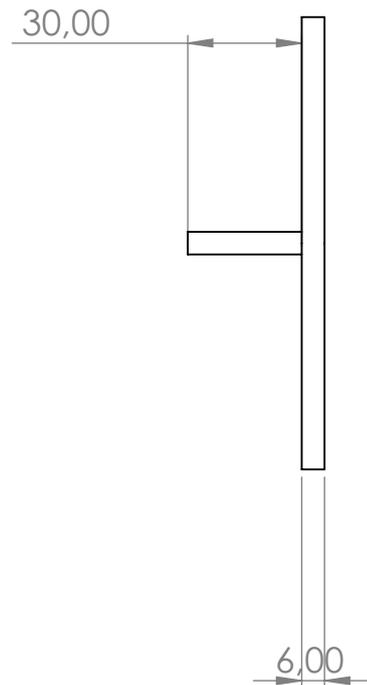
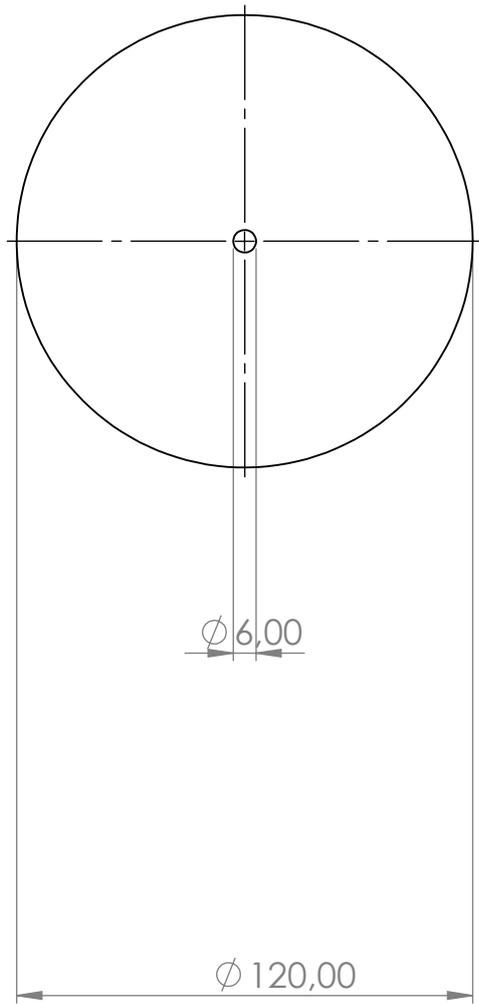
A4	Chapeau	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 2/1		
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	01/07/2021



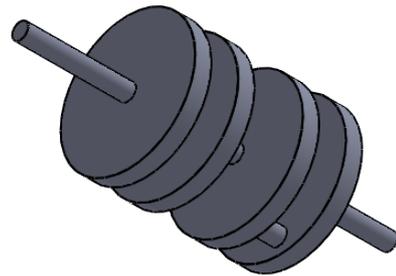
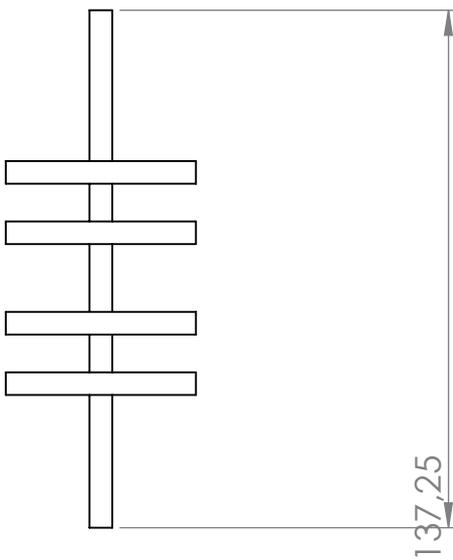
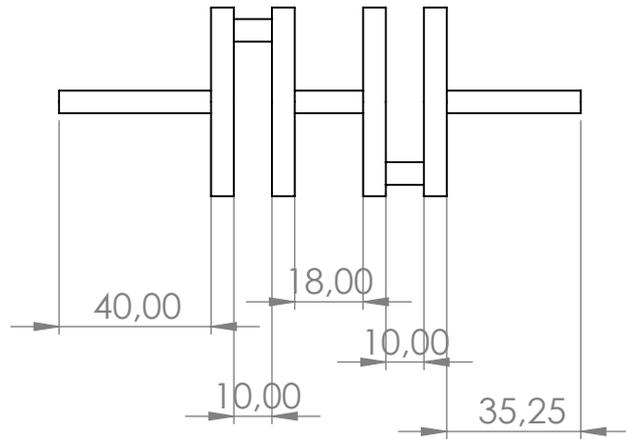
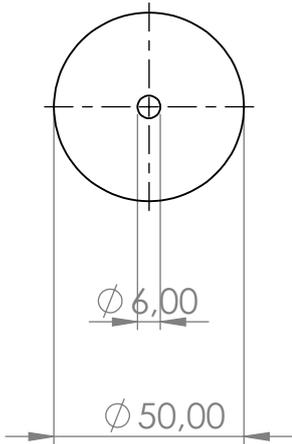
A4	La bielle	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	01/07/2021



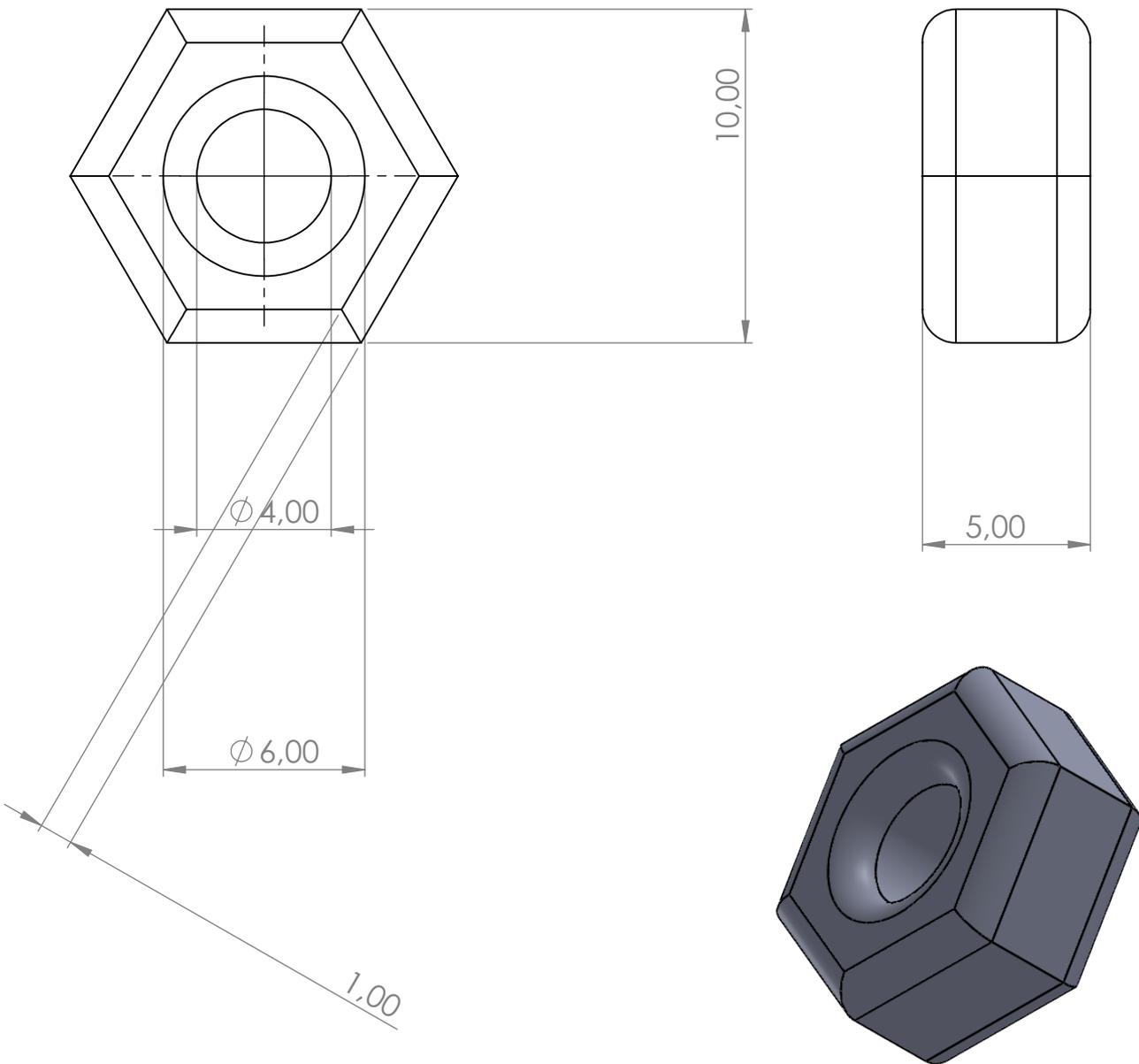
A4	Support	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4	Volant d'énergie	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4	<h1>Vilbrequin</h1>	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/2		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	



A4

Echelle : 5/1

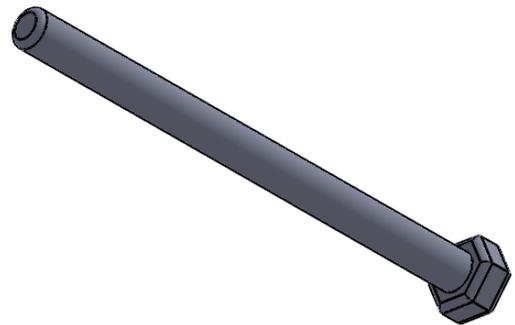
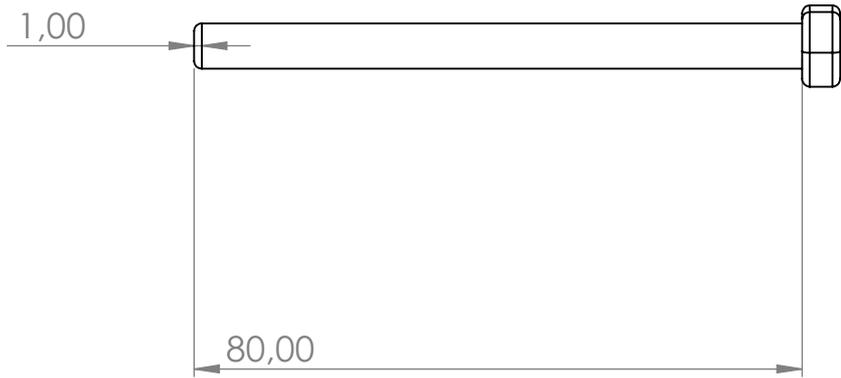
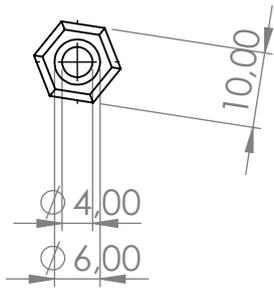
L'écrou

Sahraoui Younes  
Azizi Amine



Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira

01/07/2021



A4	Vis	Sahraoui Younes Azizi Amine
Echelle : 1/1		01/07/2021
	Université Akli Mohand Oulhaj - Bouira	

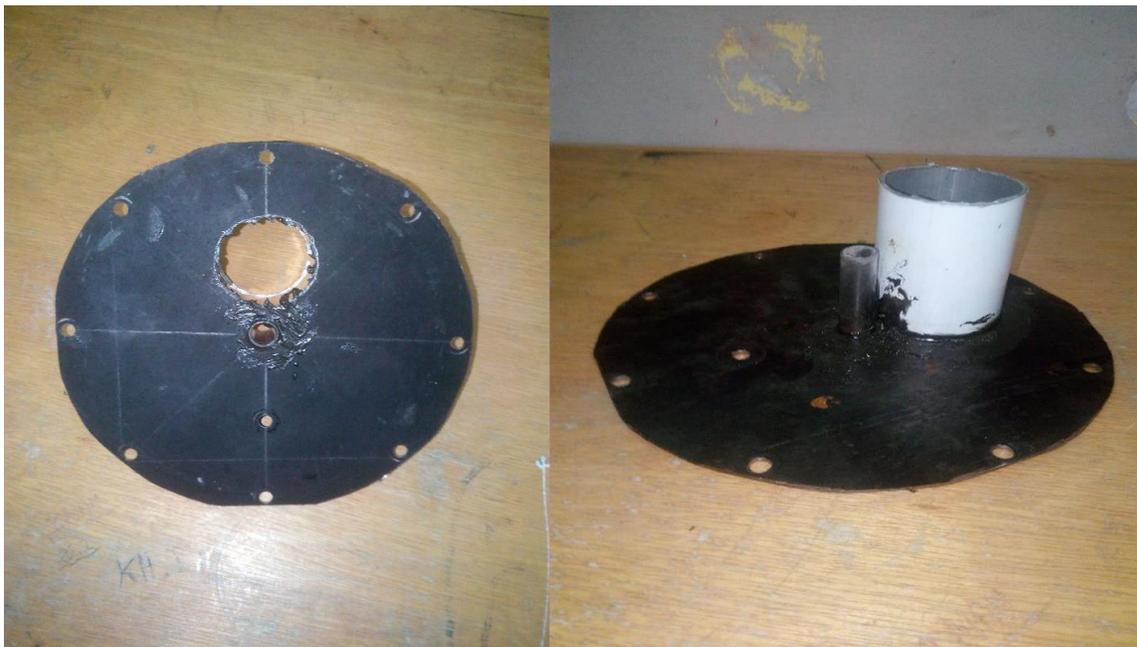
**ANNEXES 2**

**LES PHOTOS DES**

**PIECES DE REALISATION**



**Moteur STIRLING (Gamma)**



**Plaque supérieure et Cylindre de piston**



**Plaque inferieure et Cylindre de déplaceur**



**Boulon**



**Déplaceur**



**Piston**



**Support**



**Chapeau**



**Volant d'inertie**



**Bielle**



**Vilebrequin**