



Projet LU3PY024 : Moteur Stirling

MOURY Mathilde, RAKOTOASIMBOLA Allan, SALIQUE Taddeo, THEVENET Thomas, VUAGNAT Quentin
Professeur référent: M. Massimiliano MARANGOLO

Nous remercions MM. Jean-Philippe Ferreira et Laurent Teixeira, techniciens en charge des projets, ainsi que Mme Florie Lopis, de l'atelier du verre pour leur attention et l'aide qu'ils ont apportées à notre projet et aussi M. Vincent Corcé pour nous avoir donnés les seringues.

1 Introduction

Initialement utilisé pour concurrencer les moteurs à vapeur qui explosent souvent, Robert Stirling inventa un moteur à air chaud au début du XIXème siècle mais le moteur de Stirling n'eut pas beaucoup de succès industriels, jugé peu puissant par rapport aux autres moteurs. Mais la réversibilité du cycle thermodynamique de Stirling permet au moteur thermique de devenir une pompe à chaleur, application finalement la plus usitée de ce moteur.

Dans le cadre de l'UE LU3PY024, nous avons étudié un système de réfrigération basé sur un moteur Stirling. L'objectif de ce système est de générer du "froid" à partir d'un moteur. Nous avons envisagé au départ de modéliser un moteur Stirling dans le but de mesurer son efficacité à transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Cependant, suite à des complications techniques et sur les conseils de notre professeur référent, M. Marangolo, nous avons opté pour faire une étude sur le froid "Stirling" à partir de notre moteur. Nous avons comparé la température finale du système en fonction de la puissance mécanique fournie par le moteur.

2 Théorie

Le moteur de Stirling repose sur un principe physique simple qui est que plus la température d'un gaz est élevée, plus il occupera un volume important dans l'espace. On va donc se servir de ce principe pour que l'expansion du gaz chauffé puisse fournir un travail.

Il existe trois types de moteur Stirling, reposant tous sur le même principe général décrit précédemment mais présentant chacun des formes, des avantages et des inconvénients différents, notamment en termes de conception.

- Le type alpha (α) utilise deux pistons, un dit "chaud" car placé près d'une source chaude et un autre dit "froid" car il est séparé du deuxième et présente donc une température bien plus basse. Cette particularité, bien que avantageuse en termes d'efficacité, implique d'assurer l'étanchéité de chacun des pistons, ce qui n'est pas toujours facile pour le piston chaud car sa température élevée restreint l'utilisation de joints. Si ces problèmes sont contournés, le moteur de type alpha est celui qui possède le meilleur rendement, avec un rapport puissance-volume très élevé par rapport aux deux autres types.

- Le type bêta (β) est quant à lui composé d'un premier piston qui gère la compression et la détente ainsi que d'un second piston qui permet alternativement la chauffe et le refroidissement du gaz. Ce type à l'avantage d'être compact car les deux pistons sont dans le même cylindre. Cependant comme la zone chaude et la zone froide sont elles aussi dans le même cylindre, le type bêta donne aussi lieu à des pertes thermiques par conduction. Il ne présente quasiment pas de perte aérodynamique et permet une compression élevée

mais son efficacité est tout de même réduite par rapport au type alpha.

- Le type gamma (γ) ressemble au bêta, à la différence que celui-ci utilise un piston et un déplaceur qui ne sont pas situés dans le même cylindre. Ceci facilite la réalisation de l'étanchéité car elle n'est nécessaire que pour le piston. Bien que le type gamma soit le plus facilement réalisable, il présente un volume mort qui limite grandement son rendement.

On peut représenter les différentes étapes mécaniques à l'aide d'un cycle thermodynamique.

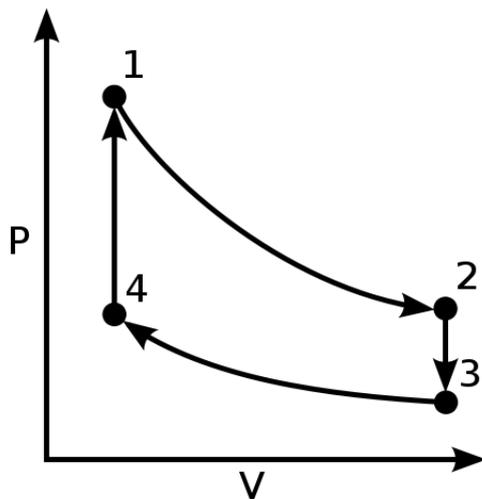


Figure 1: Cycle thermodynamique d'un moteur Stirling

Le cycle thermodynamique que réalise notre moteur peut se décrire sur un diagramme de Clapeyron, c'est-à-dire un diagramme représentant la pression en fonction du volume. Le cycle thermodynamique comporte 4 étapes. La première correspond à un chauffage isochore c'est-à-dire à volume constant ($4 \rightarrow 1$), qui va permettre dans un second temps l'expansion du gaz qu'on considérera à température constante. Cette seconde étape est appelée détente isotherme ($1 \rightarrow 2$). Ces deux étapes correspondent au chauffage du piston de la source chaude, qui engendre une augmentation de la pression puis du volume dans les deux cylindres. On a ensuite un refroidissement isochore ($2 \rightarrow 3$) qui correspond au moment où les pistons des seringues sont en bout de course, et que l'air contenu dans le piston froid se refroidit. Enfin, on a une compression isotherme ($3 \rightarrow 4$). Les pistons sont donc revenus à leurs positions initiales et le cycle peut recommencer. Ce cycle thermodynamique prend en compte des approximations (détente/compression isothermes et

chauffage/refroidissement isochore) qui vont nous permettre de calculer de façon approchée le travail fourni au cours de ce cycle. En réalité, et encore plus dans notre cas, un tel cycle est impossible à obtenir expérimentalement.

Ce cycle peut s'effectuer dans un sens ou dans l'autre, permettant ainsi soit d'avoir un fonctionnement correspondant à un moteur, soit à celui d'une pompe à chaleur ("frigo").

3 Méthodologie

Pour mesurer la variation de température et les tours-minute, il nous fallait fabriquer un moteur Stirling. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur un modèle alpha trouvé sur Internet. Dans ce modèle, les pistons moteur et de marche étaient constitués par des seringues en verre et la source chaude par une lampe à alcool. Outre les deux seringues, notre moteur est composé de pièces de supports en MDF (bois) de 5 mm d'épaisseur, et de pièces en PLA (plastique). Nous avons utilisé le logiciel FreeCAD pour dessiner les modèles 3D et les esquisses, qui ont été respectivement imprimés et découpés au laser.



Figure 2: Pièces détachées du moteur

Au cours de l'assemblage, nous avons renforcé les différentes structures par des équerres en acier (supports des seringues) ou des pièces en MDF (supports des roues) pour renforcer l'ensemble, car nous étions partis sur une structure qui tenait par emboîtement. La liaison entre les deux seringues se fait par un flexible en plastique souple. Face à un certain nombre d'obstacles, nous avons décidé de changer de cap, en choisissant d'utiliser la structure déjà fabriquée et en inversant la fonction, pour en faire une pompe à chaleur ("frigo"). Nous avons donc motorisé les roues

pour qu'elles engendrent un cycle compression-décompression semblable à celui du Stirling.



Figure 3: Modèle final de la pompe à chaleur

Pour plus de détails sur cette partie, nous vous renvoyons au wiki correspondant.

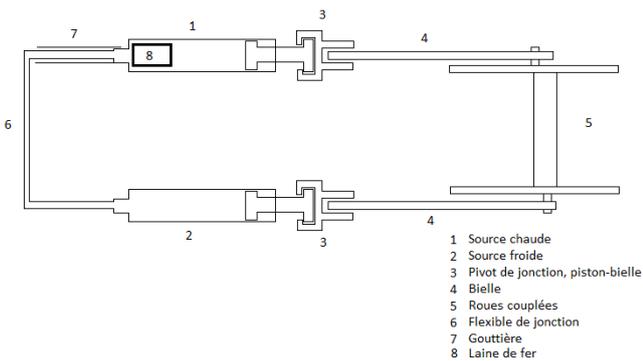


Figure 4: Schéma du moteur Stirling prévu initialement

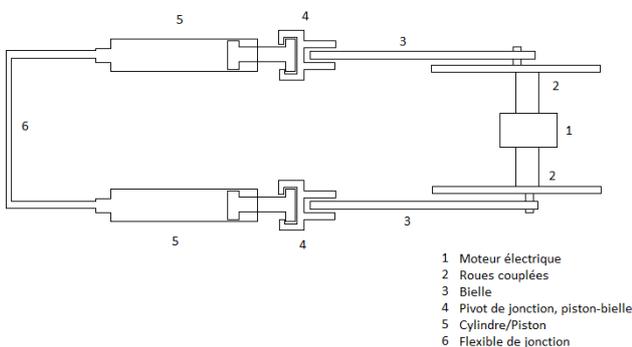


Figure 5: Pompe à chaleur basée sur le dispositif précédent

4 Résultats

Finalement, notre montage ne fonctionne pas, que ce soit sous la forme d'un moteur ou d'une

pompe à chaleur. Nous avons tout de même réfléchi à des protocoles expérimentaux pour quantifier les mesures.

4.1 Tours par minute

Pour mesurer le nombre de tours par minute du moteur ou de la pompe à chaleur (la méthode reste la même), nous aurions utilisé une photorésistance branchée en série avec une résistance, le tout connecté à une carte Arduino nous permettant de relever les valeurs de la résistance de la photorésistance. Cette pièce étant sensible à la variation de la luminosité, il nous suffisait de percer un trou dans la roue et de la placer en face de ce trou. Elle capterait une augmentation de la luminosité au passage du trou devant elle, ce qui advient une fois par tour. L'analyse de la série de valeurs (la durée de cette série était de 60 secondes avec 600 mesures, 10 par seconde) via un tableur consisterait à dénombrer le nombre de maximums et permettrait d'obtenir le nombre de tours minutes

4.2 Variations de température

Nous aurions simplement utilisé deux caméras thermiques (une pour chaque seringue) pour mesurer en temps réel la variation de température. L'utilisation de caméras thermiques ou de thermomètres laser s'explique par le fait qu'il est impossible d'introduire un thermomètre classique (en contact avec le milieu étudié) dans les seringues à moins de les adapter spécialement pour cet usage. Nous aurions fait plusieurs séries en variant la tension aux bornes du moteur et la durée de la prise.

5 Discussion

Dans cette partie, nous allons lister les différentes sources de problème qui ont pu gêner ou empêcher le moteur de fonctionner.

Un des problèmes majeurs de ce moteur est la grande quantité de frottements mécaniques. Ils sont présents au niveau des pistons, de l'axe des roues et des bielles. L'idée initiale d'assembler le moteur par emboîtement a conduit à une multiplication des pièces instables, qui fragilisaient la structure, et lui conféraient une élasticité problématique; la structure accompagnant le mouvement des pistons. Néanmoins, ces problèmes se

seraient réglés par un assemblage renforcé et une fixation correcte des seringues. L'utilisation de roulements à billes n'aurait pas due être négligée au départ.

Pour ce qui est du moteur Stirling, il fallait aussi prendre en compte l'effet que la source chaude (environ 350°C) avait sur les composants du moteur. La température était telle que les seringues en verre présentaient une dilatation à la chaleur suffisamment importante pour bloquer complètement le piston, bien qu'elles soient soi-disant en verre borosilicaté, ce qui sera infirmé par le verrier lors de la réparation du piston brisé. Il y avait de plus l'étanchéité du flexible de liaison à gérer, l'essai d'une gouttière de refroidissement n'ayant finalement pas été concluante. Pour résoudre ces problèmes, il nous aurait fallu obtenir des seringues en verre borosilicaté, ou alors fabriquer des cylindres résistants à des températures équivalentes à celles obtenues et étanches aux gaz, ce qui n'était pas dans nos compétences.

L'intérêt de passer du moteur à la pompe à chaleur était de supprimer les problèmes dus à la chaleur. Il fallait en contre partie utiliser un moteur électrique dont la puissance s'est avérée être insuffisante pour comprimer l'air contenu dans les seringues. Nous vous renvoyons à la page de calculs correspondant déposée sur le wiki (cf 30 avril). Nous aurions dû, pour contrer ce problème, réduire la variation du volume d'air comprimé en diminuant la course des pistons ou en refaisant de nouvelles seringues d'un diamètre plus petit et, en plus, démultiplier la puissance du moteur avec un système de pignons. Avec les valeurs

obtenues par les calculs, il aurait fallu au moins démultiplier par 10 (dans le cas d'une surtension de 6V) les tours minutes, et ce en négligeant les frottements des pistons, pour espérer un début de compression.

References

- [1] Avertissian, T. (2018). *Fabrication et caractérisation de micro moteurs Stirling à pistons libres, pour la récupération d'énergie thermique à basse température (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke)*
- [2] Incroyables expériences. (2018, 10 novembre). *Fabriquer un moteur Stirling - Moteur thermique à air / solaire*. [Vidéo en ligne].
- [3] Wikipédia l'encyclopédie libre, *Moteur Stirling*.
- [4] Incroyables expériences, *Fabriquer un moteur Stirling - Moteur thermique à air / solaire*. [Document].
- [5] Groupe 9, *Wiki du projet*.
- [6] Lanciaux, N. (2015). *Contribution au développement d'un moteur Stirling : De la cogénération dans le bâtiment à l'autonomie énergétique (Thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne)*.
- [7] Wikipedia l'encyclopédie libre, *Froid Stirling*.