

Moteur Stirling : Théorie, Conception et Pratique

A.Roll, G.Morel, K.Iyinbor¹

¹Licence de Physique

Résumé - L'article suivant a pour but de présenter l'ensemble des faces de notre projet : de la théorie à l'application pratique en passant par la conception et la fabrication du moteur. Nous essayerons de rester le plus succinct possible : nous expliquerons la théorie derrière ce moteur thermodynamique, sans entrer dans les détails de calculs relativement longs. Aussi, nous expliquerons, durant la partie conception, les différents problèmes qui sont survenus durant la conception du moteur, ainsi que notre choix d'utiliser les données d'autres scientifiques.

1 Introduction

Le moteur Stirling fut inventé puis breveté en 1816 par Robert Stirling, mécanicien et pasteur, pour résoudre le problème des chaudières à vapeur explosant à cette époque, car soumises à des pressions trop importantes. Ce moteur ne sera industrialisé que bien plus tard par des entreprises tel que Philips dans les années 1930, car sa puissance est bien trop faible comparée aux moteurs de son temps. Cependant, le moteur Stirling marche avec tout type d'énergie, ce qui le rend intéressant aujourd'hui compte tenu des enjeux écologiques majeurs et des énergies renouvelables. Aussi, l'un des points forts de ce moteur est sa capacité à refroidir : un moteur Stirling entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur capable de refroidir à -200 °C ou de chauffer à plus de 700 °C , selon le sens d'entraînement. C'est notamment cette capacité à refroidir qui est utilisée par la NASA pour la conception de leur cryogénéiseur.

Remarque : Encore aujourd'hui, le moteur Stirling est étudié, aussi bien par les amateurs que par les entreprises privées ; de plus, il s'agit du moteur le plus intéressant pédagogiquement, afin d'introduire les cycles thermodynamiques.

2 Théorie

Le but du moteur Stirling est de créer de l'énergie mécanique à partir d'énergie thermique, en suivant un cycle thermodynamique réversible :

1. un chauffage isochore
2. une détente isotherme
3. un refroidissement isochore
4. une compression isotherme

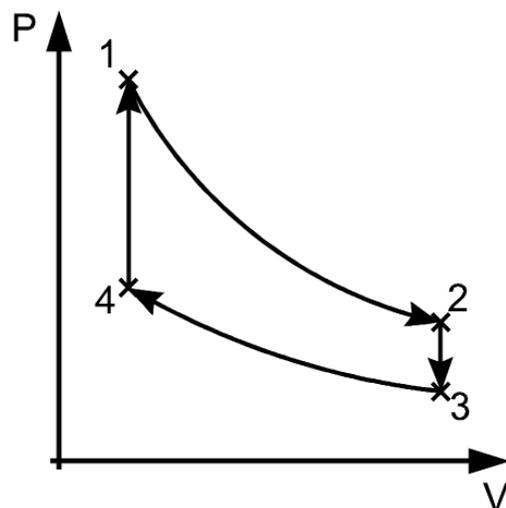


FIGURE 1 – Cycle de Clapeyron d'un moteur Stirling

Ce diagramme est réalisé en supposant le gaz parfait dans les conditions d'utilisation et en l'absence de régénérateur. Ainsi, après application des lois de la thermodynamique à chaque phase, on trouve un rendement théorique (c'est-à-

dire l'énergie reçue du gaz sur l'énergie fournie au gaz) :

$$\eta = \frac{R(T_c - T_f) \ln \frac{V_2}{V_1}}{C_v(T_c - T_f) + R * T_c \ln \frac{V_2}{V_1}} \quad (2.1)$$

avec R la constante des gaz parfaits et $C_v = \frac{3R}{2}$ la capacité calorifique molaire du gaz (ici de l'air) à volume constant ; les T_i et V_i représentent les températures et volumes à certains moments du cycle. Cependant 2 points essentiels sont à noter :

- dans le cadre réel, le gaz aura tendance à avoir du mal à être chauffé de manière uniforme ; une partie de ce gaz sera considérée comme du "volume mort", ce qui modifiera la forme du cycle, qui tendra plus vers une forme elliptique ;
- il est à noter qu'il existe plusieurs types de moteurs stirling (α, β, γ), dont nous expliquerons les propriétés et avantages/inconvénients plus tard dans le rapport, et en fonction de leurs propriétés, ce diagramme s'en verra modifié. Le moteur stirling possède l'avantage d'être silencieux dû à l'absence d'explosions, d'être réversible, lui permettant de marcher comme une pompe à chaleur ; et pour finir son rendement est plutôt bon en présence d'un régénérateur (40% pour les meilleurs actuellement). Cependant son utilisation reste limitée, car l'obtention d'un rendement élevé s'effectue en présence d'une source très chaude, avoisinant les 2000°C ; ainsi les moteurs industriels marchent avec des sources de chaleur moins élevées, ce qui impactent fortement leur rendement (comme le montre les formules précédentes, moins T_c sera élevé, moins le rendement sera important). Aussi, la conception du moteur doit être parfaite : les pistons utilisés pour transmettre le travail du gaz doivent être parfaitement étanches (problème dont nous parlerons dans la partie conception).

Remarque : en présence d'un régénérateur (échangeur de chaleur interne qui permet d'accroître le rendement thermique de l'appareil), le rendement du moteur stirling devient le rendement d'un cycle de Carnot, soit $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ qui est le rendement le plus efficace qui soit.

3 Conception de notre moteur

Il existe plusieurs types de moteurs stirling, chacun ayant leur spécificité : - α : ce type de moteur contient 2 pistons séparés et reliés par un tuyau ;

- β : utilise un volume de gaz qui se situe entre 2 pistons situés dans le même cylindre ; les parties froides et chaudes sont de part et d'autre du cylindre. Ce moteur a pour avantage d'être plutôt compact, et est celui le plus utilisé dans la production industrielle ;

- γ : constitué d'un piston moteur et d'un déplaceur. Le piston déplaceur met le gaz en contact entre la zone chaude et froide ce qui fait varier la température du gaz. Ce moteur est le plus simple des 3 à réaliser, mais c'est aussi celui qui possède le moins bon rendement, car son volume mort est trop élevé.

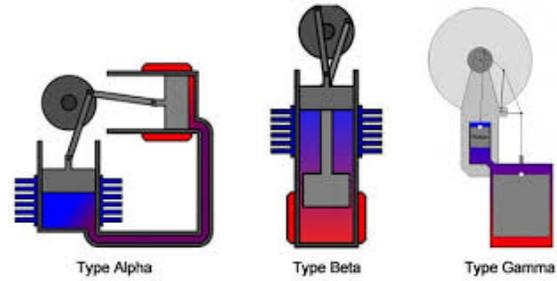


FIGURE 2 – différents types de moteurs stirling

Pour notre projet nous sommes partis sur la réalisation d'un moteur de type α , car c'est le moteur qui possède le ratio puissance-volume le plus élevé, et ce moteur n'est pas le plus dur à réaliser (contrairement au β).

4 Outils et Techniques de conception

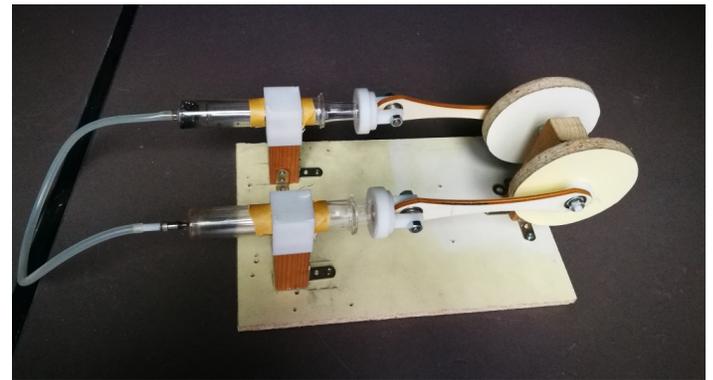


FIGURE 3 – notre moteur stirling

Au-delà de réaliser un moteur Stirling fonctionnel, l'un de nos objectifs principaux était la fabrication à moindre coût de celui-ci ; et pour ce faire tous les moyens mis à notre disposition étaient bons à prendre : de la récupération de vieilles pièces usagées à l'impression de pièces 3D.

La majeure partie, pour ne pas dire l'intégralité du processus de fabrication de la machine a pris place dans le FabLab du campus Jussieu qui a eu l'amabilité de nous laisser faire usage de nombreux outils, logiciels et machines plus sophistiquées à l'instar de la découpeuse Laser ou de la fameuse imprimante 3D qui nous le verrons, s'est avérée être très utile à la réalisation du projet.

Plutôt que de nous lancer aveuglément dans la fabrication du moteur Stirling, nous avons commencé par nous renseigner à l'aide d'articles et de vidéos de personnes ayant déjà réalisé ce type de projet et c'est alors que nous avons pu commencer à avoir une idée de la direction dans laquelle nous allons faire notre premier pas. Nous nous sommes finalement mis d'accord pour réaliser un moteur Stirling de type Alpha ; il nous restait alors à réunir les pièces nécessaires à son montage.

Un tel modèle est composé :

- d'un support sur lequel repose deux cylindre constituant les chambres froides et chaudes reliés par un tuyau, qui échangeront constamment du volume de gaz,
- de deux roues solidaires faisant office de volants d'inertie, mises en mouvement par le mouvement de translation simultané des deux cylindres,
- d'un brûleur à alcool qui sera l'énergie fournie au moteur et chargé de chauffer le gaz contenu dans l'un des deux cylindres.

Une fois que nous avons eu une idée concrète de la forme que prendrait notre moteur, nous nous sommes sans plus attendre lancé dans la fabrication de celui-ci. Premièrement, il nous fallait un support pouvant faire office de châssis et qui consisterait donc la base de la structure du moteur. Nous avons pour cela, utilisé une planche de bois épaisse et très rigide que nous avons récupéré et dont nous avons ajusté les dimensions avec une scie. Sur cette planche de bois sont venus s'ajouter trois barre de bois verticales également récupérées et coupées à la scie, que nous avons disposé en triangle – une à l'arrière de la planche centré sur l'axe de celle-ci, deux autres à l'avant répartis de part et d'autres de cet axe – de sorte à pouvoir venir fixer les éléments dynamiques du moteur, la forme triangulaire offrant un parfait compromis entre stabilité et homogénéité. La barre arrière devait accueillir les deux roues du moteur qui seraient reliées l'une à l'autre par une fine barre métallique perçant le centre de chacune des roues permettant de les mettre en mouvement simultanément.

Celles à l'avant étaient chargées de supporter chacune un cylindre.

Il nous restait alors à trouver la manière dont nous allions réaliser nos roues ainsi que les deux cylindres.

Nous nous sommes dans un premier temps attardé sur la façon dont nous pouvions nous procurer des roues. Dans un soucis d'authenticité, nous désirions vraiment tenter d'utiliser le minimum de pièces déjà prêtes à l'emploi et cherchions plutôt à fabriquer ce dont nous avons besoin dans la mesure du possible. Ainsi, pour obtenir des roues, nous avons à nouveau fait usage de bois récupéré que nous avons ensuite taillé dans une forme circulaire. Pour ce faire, nous avons utilisé une ponceuse stationnaire à bande afin de donner une forme circulaire aux morceaux de bois découpés. Ensuite, nous avons simplement percé un trou en leurs centres respectifs qui permettra de les transpercer d'une tige métallique censée les relier et les maintenir dans un mouvement commun. Cette tige devant également passer par la barre verticale séparant les deux roues, il nous a fallu aussi percer celle-ci d'un trou.

En guise de pistons, nous nous sommes contentés de seringues en verres récupérées auprès du département de Biologie du campus Jussieu. En effet, les seringues de verre fonctionnant déjà comme de véritables pistons, et faisant un bon compromis entre résistance à de grandes températures et aux déformations (cf partie 5), paraissaient être l'objet idéal pour substituer des cylindres à volume variable supposés emprisonner un gaz. Afin de leur permettre d'échanger

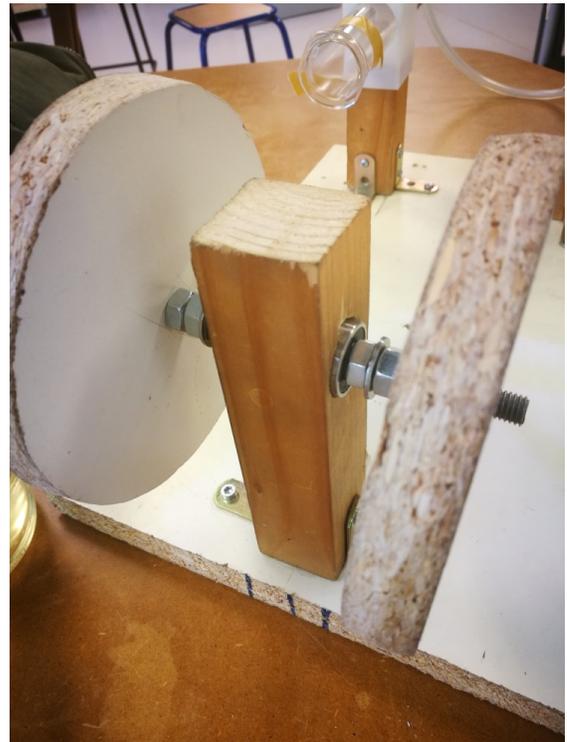


FIGURE 4 – volant d'inertie

du volume entre elles, nous avons relié les deux bouts externes des seringues par un tuyau - également récupéré chez nos amis biologistes - de faible diamètre permettant de le fixer facilement.

Pour supporter les seringues, nous étions contraint de retravailler chacune des deux barres en bois prévu à cet effet. L'idée de départ était de tailler l'extrémité supérieure censée accueillir la seringue en "U" de sorte à pouvoir placer la seringue dans le creux qui devrait alors parfaitement épouser les courbes de celle-ci. N'ayant pas réalisé la difficulté d'une telle réalisation artisanale, nous avons commencé à poncer manuellement, puis à l'aide de la ponceuse, les barres. Nous n'étions pas peu fiers du résultat, du moins pour l'une des deux barres qui parvenait à maintenir plus ou moins en équilibre l'une des seringues. Cependant, nous étions obligés de nous rendre à l'évidence que malgré le temps passé à mettre au point ces pièces, le résultat n'était pas suffisamment satisfaisant. C'est alors que nous avons eu l'idée de modéliser à l'aide de OpenSCAD - logiciel de modélisation 3D - deux modules cubiques percés chacun d'un trou béant destiné à accueillir les seringues. Ces modules ont été conçus de sorte à pouvoir les emboîter directement sur l'extrémité des barres sans nul besoin d'avoir recours à un autre moyen de fixation. Ainsi il nous restait plus qu'à faire passer chaque seringue dans son trou.

Une fois les seringues mises en place, il nous fallait ensuite assurer la transmission du mouvement de la partie mobile de la seringue - jouant le rôle de piston - aux roues. Nous avons pour cela, avec une découpeuse Laser, découpé du bois dans des chutes que nous nous étions procurés au Fa-

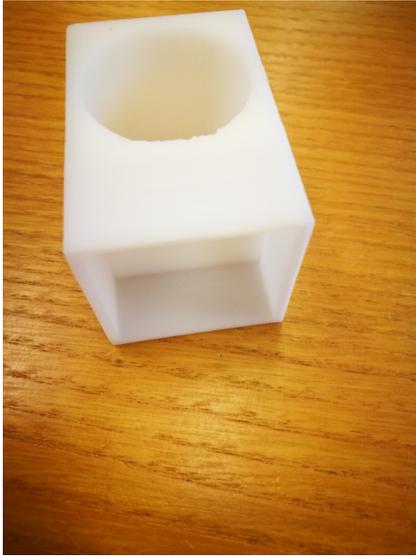


FIGURE 5 – module de maintien des seringues

bLab. Ces fines pièces de bois devait être fixées d'une part aux pistons et de l'autre aux roues. Pour chacune de ces liaisons nous nous étions là encore tourné vers l'impression 3D permettant un gain de temps considérable.

Une fois le tout monté, nous avons commencé par tester si



FIGURE 6 – transmetteur

la machine pouvait effectivement tourner lancée manuellement ; c'est à ce moment que nous avons réalisé que le mouvement des roues était rapidement freiné dû aux nombreux frottements cumulés sur tout le système notamment au niveau des pistons, de la transmission ainsi qu'au niveau de l'axe reliant les deux roues qui dissipait énormément d'énergie du fait des frottements avec la barre en bois par laquelle elle passait.

Pour remédier à ce problème, nous nous sommes procurés des roulements à bille auprès d'un magasin de planches à



FIGURE 7 – pièce de transition

roulettes avoisinant le campus. Nous avons ensuite placé ces roulements à des endroits stratégiques, en particulier au niveau des liaisons entre les différentes pièces mobiles du moteur. En ce qui concerne les frottements des pistons contre la seringue, nous avons premièrement pensé à graisser les seringues avec de la vaseline. Cela paraissait initialement être une bonne idée, mais nous nous sommes rendus à l'évidence que l'effet se dissipait rapidement et que par la suite, c'était l'effet inverse qui prenait place. Finalement, quand le moteur paraissait conserver son mouvement assez longtemps, nous avons enfin pu essayer de le faire fonctionner avec un brûleur à alcool en guise de combustible. Ce brûleur a simplement été réalisé avec un pot contenant de l'alcool à brûler, fermé par un pot percé d'un trou par lequel passait une mèche. La mèche étant partiellement immergée dans l'alcool, celui-ci y remontait par capillarité et nous avons alors simplement à allumer le bout de la mèche dépassant du pot.



FIGURE 8 – brûleur à alcool

5 Application de la Théorie :Analyse Mécanico-Physique

Compte-tenu de notre problème pour obtenir des seringues étanches en verre, pouvant supporter une température, nous avons décidé de réaliser les applications en 2 temps : premièrement, nous avons effectué les mesures qui étaient possibles sur notre moteur (différence maximale de température entre les seringues après chauffage, écart angulaire α , etc.); puis nous avons tenté d'effectuer des calculs à partir de données relevées par des ingénieurs ayant réalisés un moteur amateur, ce sont les 2 frères de la chaîne youtube "Science Etonnante". Par ailleurs, nous nous sommes grandement inspiré de leur théorie du moteur, qu'ils ont condensé dans un article; durant cette partie, nous nous appuyons essentiellement sur leur théorie et certains de leur calculs mêlés à nos valeurs. //

notre moteur Dans un premier temps, nous avons mesuré la différence maximale de température entre les 2 seringues, et si cela avait un impact sur la non mise en marche du moteur; nous mesurons une différence de 400k à peu près. Nous nous sommes de base demandé si la seringue froide devrait être plus froide, mais, compte tenu de la fragilité du verre (cf référence :Propriétés mécaniques des verres) et de la faible différence entre 0°C et 20°C, ce n'est pas une différence de température qui faisait défaut. //

Nous avons aussi calculé l'angle théorique entre le levier reliant le piston et le volant d'inertie, à partir des données géométriques de notre circuit mécanique. Nous obtenons la formule suivante :

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{V_{max} - V_{min}}{Sl}\right) \quad (5.1)$$

avec $V_{max}-V_{min}$ =différence entre les volumes du gaz des 2 pistons et Sl =volume pur de la seringue

Cette formule diffère de celle de la théorie de Science étonnante, car nous avons réalisé plusieurs approximations permettant d'arriver à cette formule. Aussi, nous avons vérifié la formule en passant par des calculs de mécanique analytique, nous retompons sur un résultat plutôt similaire.

Pour finir sur notre moteur, nous avons aussi tenté d'établir la résistance de la seringue vis-à-vis des contraintes qu'elle subit, soit la résistance de la seringue aux déformations. Pour cela, on utilise la théorie des verres, qui nous dit que dans un domaine de températures pas trop élevé (loin de la transition, c'est le cas ici car on s'intéresse aux déformations du piston donc loin de la zone de chaleur), le verre peut être considéré comme un matériau élastique idéal obéissant à la loi de Hooke sous forme tensorielle :

$$\sigma_{ij} = \lambda * Tr(\epsilon) + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (5.2)$$

avec :

$-\sigma$ qui représente le tenseur des contraintes du verre;

$-\epsilon$ est le tenseur de déformations (on aura fait au préalable l'hypothèse des petites déformations, nous permettant de

concevoir ce résultat);

$-(\lambda, \mu)$ qui sont les coefficients intrinsèques du matériau.

Pourquoi s'attarder uniquement sur la seringue et sur une zone éloignée de la flamme? La seringue de verre est l'élément principal du montage : les autres pièces, faites à la main ou par impression 3D, peuvent être testées puis modifiées en changeant les matériaux; ce n'est pas le cas des seringues. De plus, l'élément qui va modifier le plus la structure de la seringue est certes la flamme du brûleur, mais cette déformation n'est pas causée par la partie mécanique de la seringue, mais plus par sa composition physico-chimique; cette analyse reste hors de nos compétences, d'autant plus qu'après nos essais, nous n'avons vu aucune modification significatives du verre; de ce fait nous nous intéressons donc à la percussion du piston sur la seringue. Après application à nos seringues et en faisant quelques hypothèses (tel que le déplacement selon la verticale lors de la transmission du mouvement entre la seringue et l'arbre est négligeable), nous obtenons un tenseur de contraintes de la forme suivante :

$$[\sigma(x, t)] = \begin{pmatrix} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Cette forme de tenseur nous permet d'affirmer que la seringue ne subit pas de déformation (ou qu'en tout cas, cette déformation est fortement négligeable comparé au déplacement du piston).

Pour aller plus loin, nous aurions pu ajouté les forces linéiques de frottement aux contraintes des parois du verre, que l'on pourrait modéliser à partir d'une courbe de Stribeck (après lubrification des seringues), mais cela requiert énormément de mesures, de manipulations, et de techniques d'ingénierie dont nous ne sommes pas capables nous-même (faute d'expérience).

analyses des données d'un moteur fonctionnant

Dans cette partie nous utiliserons les données collectés par les 2 ingénieurs de Science étonnante. A l'aide d'un tachymètre, la vitesse de rotation du volant d'inertie moyenne mesurée (à température maximale du gaz, c'est-à-dire 400°C) est $\Omega = 220$ tours par minutes, soit $\Omega = \frac{220}{60} = 3.67$ tours/seconde.

La puissance du cycle du moteur est $P=1.2$ Watts. Cette puissance est fournie par un tour du moteur, on peut donc estimer le travail du desservi par le moteur :

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{W}{\Omega} \Leftrightarrow W = \frac{P}{\Omega} = 0.32 J/cycle \quad (5.4)$$

Cette valeur du travail est donc l'énergie produite par le moteur. Il nous reste le calcul du rendement : ce calcul est assez compliqué car il fait appel à une « cascade de rendements » (la théorie est expliquée dans le rapport [2] dans les références). On trouve alors un rendement :

$$\eta = \frac{P}{P_{consomme}} = \frac{1.2}{260} = 0.46\% \quad (5.5)$$

avec Pconsommée :puissance consommée par le brûleur à alcool (voir théorie dans le rapport [2]). On s'aperçoit que le rendement est vraiment faible comparé à la théorie du moteur stirling ; mais nous pouvons essayer d'argumenter cela à partir de plusieurs points :

1. le moteur construit est un moteur réalisé par des passionnés, non pas par des professionnels ; de ce fait, la recherche d'un rendement optimal obtenu potentiellement par des techniques industrielles n'a possiblement pas été leur priorité ;
2. le dimensionnement du moteur fait que l'exploitation du volant d'inertie est limitée ;
3. l'absence de régénérateur réduit fortement les capacités du moteur ;
4. la température maximale de la partie chaude est limitée, ce qui limite encore plus les capacités du moteur.

6 Conclusion

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, dûs 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.

Durant ce projet, nous avons été confronté aux problèmes classiques de l'ingénieur en thermodynamique : mise en place de la théorie, conception puis analyse et comparaison à la théorie précédente. Cependant, nous avons été trop optimistes quant au déroulement optimal de ce projet : concevoir un moteur de toutes pièces, qui plus est un moteur stirling, demande beaucoup de temps (plus que 4 mois) et coûte cher. Nous avons néanmoins appris de nombreuses choses, du côté manuel et modélisation : exceptées certaines pièces comme les roulements, l'ensemble des autres pièces ont été créées à la main ou par découpeuse laser/imprimante 3D. Le principal problème dans ce genre de projet est la partie la plus coûteuse, ici les seringues, qui nous a bloqué pendant 3 mois de conception, dû au fait d'avoir des difficultés à trouver des seringues en verre optimisées pour notre problème.

Malgré le fait que nous n'ayons pas réussi à réaliser un moteur fonctionnel à temps, nous restons optimistes pour la suite : ayant récupéré deux seringues parfaitement étanches une semaine avant la fin du projet, nous allons essayer de finaliser notre moteur durant le mois de Juin, en modifiant tous les éléments du montage pour les adapter à nos nou-

veaux pistons, et réaliser de nouveaux essais, avec du matériel plus efficace cette fois-ci.

Références

- [1] *différents types de Moteur Stirling.* <https://sites.google.com/site/techbasa323groupe6/moteur-stirling/les-differents-types-de-moteur-stirling>.
- [2] A. et Viktor de Science étonnante. *Fabriquer un moteur Stirling.* <https://www.youtube.com/watch?v=s79odgWz6BM&t=1s>, 2018.
- [3] Wikipédia. *Courbe de Stribeck.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_de_Stribeck.
- [4] Wikipédia. *Moteur Stirling.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling#Principe.
- [5] Wikipédia. *propriétés thermiques du verre.* http://www.verreonline.fr/v_plat/prop_therm1.php.
- [6] J. Zarzycki. *Propriétés mécaniques des verres,Revue de Physique Appliquée.* <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00244242>, 1977.