

*Projet de Physique P6-3*  
*STPI/P6-3/2011 – 20*

**Réalisation d'un moteur à air chaud Stirling de  
type gamma**



**Etudiants :**

**Fabien ORQUIN**

**Jean-Pierre LEE**

**Hicham BELAHMER**

**Felipe DA CUNHA NUNEZ**

**Nicolas MICHEL**

**Pierre LEROY**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Fauzi Dhaouadi**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : 15/06/2012

Référence du projet : STPI/P6-3/2011 –n°20

Intitulé du projet : Réalisation d'un moteur à air chaud Stirling de type gamma.

Type de projet : *Expérimental*

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

L'objectif principal de ce projet est de se familiariser avec la démarche de fabrication d'un moteur Stirling gamma dans le but de comprendre très concrètement comment fabriquer et monter le moteur. L'objectif est aussi d'approprier les outils nécessaires à sa fabrication, ainsi que de développer l'esprit d'équipe et l'esprit d'autonomie de chacun au sein du groupe.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **moteur, Stirling, air chaud.**

## Table des matières

1. Introduction .....	5
2. Le fonctionnement du moteur Stirling – Synthèse des recherches. ....	6
2.1. Rapide Historique.....	6
2.2. Principe.....	6
2.3. Les différents types de moteur Stirling .....	9
2.4. Avantages, inconvénients et applications .....	10
3. Méthodologie / Organisation du travail .....	13
4. Travail réalisé et résultats .....	14
4.1. Pièces et matériaux associés .....	14
4.2. Usinage et assemblage du moteur.....	15
4.2.1. Découverte des éléments.....	15
4.2.2. Etapes d'usinage (voir également l'annexe 1 pour la gamme d'usinage).....	15
4.2.3. Assemblage final.....	16
4.3. Problèmes et résolution.....	17
4.3.1. Dans l'assemblage .....	17
4.3.2. Démarrage du moteur .....	17
4.4. Résultats .....	17
5. Conclusions et perspectives.....	18
5.1. Conclusions personnelles .....	18
6. Bibliographie .....	20
7. Annexes.....	21
7.1. Gamme d'usinage .....	21

## 1. INTRODUCTION

Lors de la deuxième année d'étude à l'INSA de Rouen, les élèves se voient attribuer un projet traitant du sujet de leur choix parmi une liste. C'est l'occasion pour nous de bénéficier très tôt d'un enseignement particulier, celui de la réalisation en équipe d'un projet. Cette enseignement mets en valeurs les qualités nécessaires au métier d'ingénieur : le travail d'équipe, la gestion du temps, l'autonomie dans les recherches et l'exécution du planning.

En première année nous avons étudié la thermodynamique en appliquant notre savoir théorique sur l'étude de moteurs sterlings. C'est ainsi que notre curiosité quand à la fabrication concrète d'un moteur sterling nous a réunit. C'est la possibilité de faire l'expérience de notre savoir théorique afin de mieux concevoir la thermodynamique et ses applications. De plus, la fabrication d'un objet est sujette à procédure précise comme nous pouvons l'apprendre en cours de CTI par exemple, c'est aussi l'envie de découvrir ailleurs que dans les livres cet aspect qui a tout particulièrement attiré notre attention.

Pour réaliser se projet, nous nous sommes réuni chaque semaine sous la tutelle de monsieur DHAOUADI afin de faire le point sur l'avancé de nos travaux ainsi que de nous répartir les taches. Si les recherches et la documentation s'est faite à la maison, il est important de noter que la fabrication du moteur s'est déroulé dans sa plus grande partie lors des séances prévues.



## 2. LE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR STIRLING – SYNTHÈSE DES RECHERCHES.

### 2.1. Rapide Historique

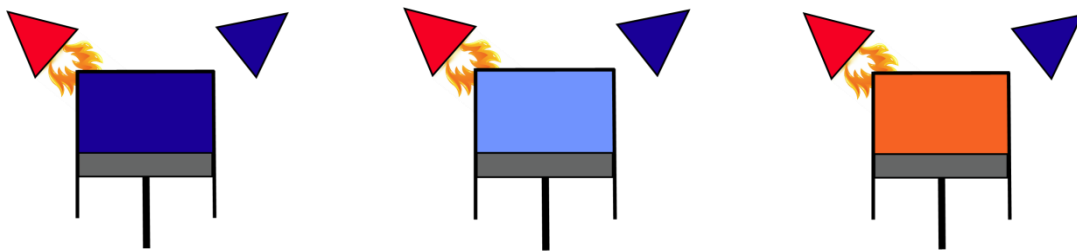
Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, ère d'industrialisation, les chaudières à vapeur consistaient en la technologie motrice la plus utilisée. Cependant il était fréquent que des accidents surviennent à cause des trop fortes pressions que les chaudières enduraient parfois les conduisant à l'explosion. Pour répondre à ce problème, Robert Stirling imagine un moteur à combustion externe, sans chaudière. La découverte de Stirling est déposée le 27 septembre 1816. C'est aussi lui qui découvre l'utilité de la mise en place d'un tuyau régénérateur afin d'améliorer le rendement. En 1843, son frère James « industrialise » ce moteur, pour une utilisation dans l'usine où il est ingénieur. Toutefois, en raison de différents bris et d'une puissance trop faible par rapport à la machine à vapeur et au moteur à combustion interne, le moteur à air chaud de Stirling n'obtint pas le succès escompté. Le moteur Stirling n'est alors plus qu'un objet d'étude pour les physiciens, qui comprennent le fonctionnement du moteur Stirling, bien après son invention, avec l'avènement de la thermodynamique.

### 2.2. Principe

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe qui possède un rendement remarquable car l'étude de son fonctionnement thermodynamique montre qu'il est basé sur un cycle réversible. Il a aussi l'avantage de n'avoir ni admission, ni échappement, c'est un cycle fermé, il n'y a pas de renouvellement. Voilà la description générale du principe de fonctionnement idéal :

#### Chauffage isochore :

La source chaude cède de l'énergie thermique. La pression et la température du gaz augmentent à volume constant durant cette phase. (*La couleur bleue traduit ici une température faible et la couleur rouge une température élevée*)

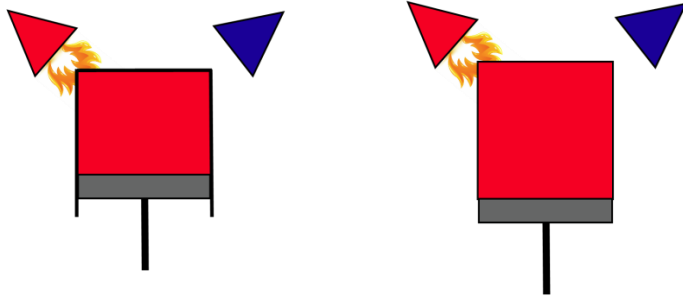


#### Détente isotherme :

La pression diminue, la température et la quantité d'air contenue dans le cylindre ne change pas, ainsi d'après la loi de conservation des gaz parfaits, on a forcément une augmentation du volume.

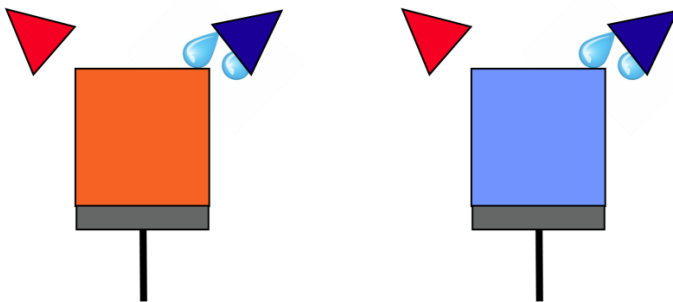
C'est cette augmentation de volume qui est à l'origine de la production de l'énergie motrice du moteur.





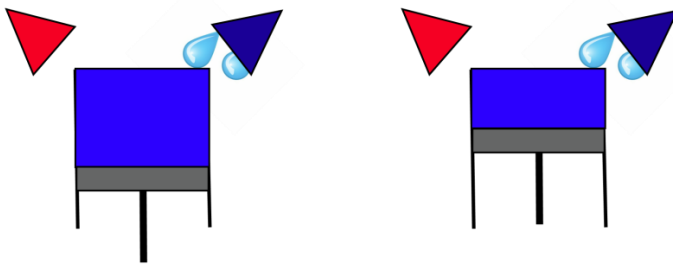
Refroidissement isochore :

Le volume reste constant, mais la température et la pression diminuent durant cette phase.



Compression isothermique :

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue et ceci à température constante. On doit nécessairement fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.



**Etude thermodynamique.**

Il existe 3 types de moteurs Stirling :  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . Tous suivent le même principe thermodynamique, dont le cycle idéal théorique peut être décrit par le diagramme suivant :

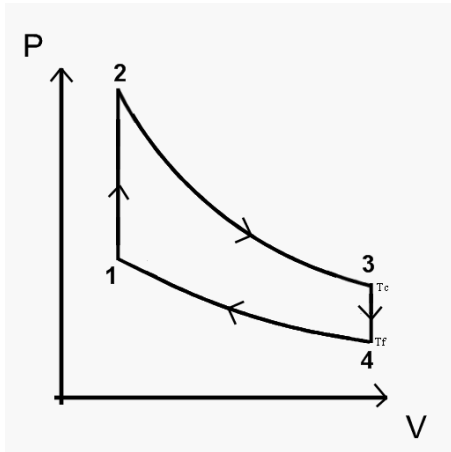


Figure 1 : Diagramme de Clapeyron du cycle Stirling (théorique).

- De 1 à 2 : Chauffage isochore.
- De 2 à 3 : Détente isotherme.
- De 3 à 4 : Refroidissement isochore.
- De 4 à 1 : Compression isotherme.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = -nRT_f \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = Q_f$$

$$Q_{3 \rightarrow 4} = -nRT_c \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = Q_c$$

A partir du diagramme, nous allons établir l'expression théorique du rendement du moteur Stirling. La machine décrit un cycle, au cours de ce cycle la variation d'énergie est nulle :

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f = 0$$

D'après la relation de Clausius :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S^p = 0$$

Cycle réversible :

$$S^p = 0$$

D'où :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$





L'expression du rendement est :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie qu'il faut fournir}}$$

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_c|} = \frac{-W}{Q_c}$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{nRT_f \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{nRT_c \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}$$

Si  $\begin{cases} V_1 = V_4 \\ V_2 = V_3 \end{cases} \Rightarrow \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = -\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

Ainsi :

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

### 2.3. Les différents types de moteur Stirling

#### Le moteur de type Alpha :

Le moteur de type alpha se différencie par ses deux cylindres, un chaud et un froid. Le gaz passe de l'un à l'autre lors du cycle.

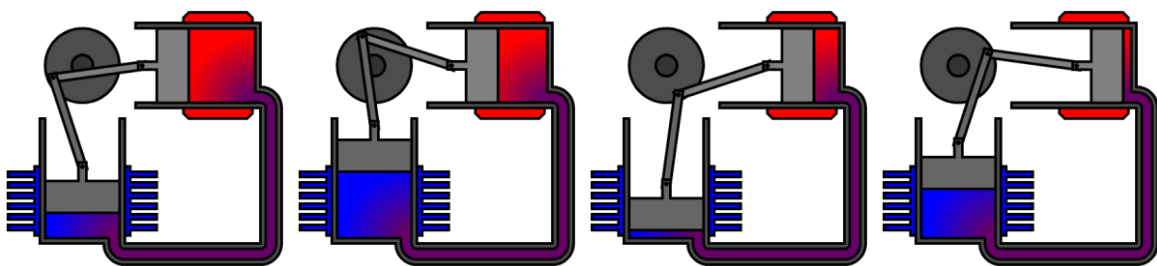


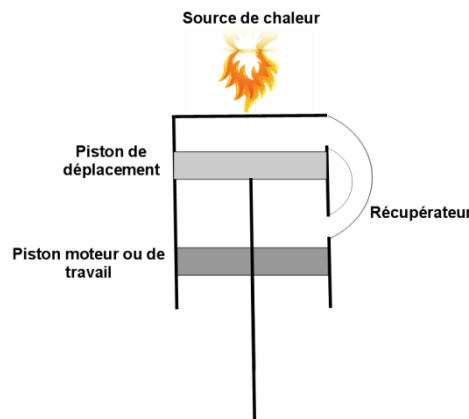
Figure 2 : Cycle du moteur stirling de type Alpha pour une rotation dans le sens horaire

L'avantage de ce type de moteur réside dans un bon rapport volume/puissance, cependant ses limites sont liées à des problèmes techniques souvent dues aux températures trop élevées du piston chaud pour ses jointures.



**Le moteur de type Beta :**

Le moteur Beta présente ne possède qu'un seul cylindre combinant la source chaude et la froide. Pour ce faire, il est doté de deux pistons, un que l'on peut définir de moteur et l'autre de déplacement. Ces pistons combinent un mouvement relatif lors du changement de volume de gaz, avec un mouvement commun, qui déplace le gaz de la partie chaude à la partie froide, et vice-versa. Le fonctionnement du moteur bêta ressemble à celui du moteur gamma, le fait que les zones chaude et froide sont situées dans le même cylindre le différencie. Ainsi, tout deux utilisent un récupérateur. Le principal avantage du moteur type Beta réside en sa compacité. Cependant, son cylindre unique est à l'origine de pertes thermiques par conduction résultant en une perte d'efficacité.



**Le moteur type Gamma :**

Le moteur Stirling de type gamma est doté d'un piston de refoulement et d'un piston moteur qui dispose d'un système d'étanchéité.

Le piston de déplacement occupe successivement la zone chaude et la zone froide, chassant à chaque fois le gaz vers la zone opposée. Les variations de température que le gaz subit alors engendrent des variations de pression qui mettent en mouvement le piston moteur.

Le volume balayé par le piston de déplacement est important face à celui balayé par le piston moteur, c'est pourquoi le moteur Gamma ne peut pas atteindre des rapports de compression élevés, ce qui son rendement. Mais d'un autre côté, sa simplicité mécanique en fait un système largement utilisé. Enfin, sa réputation de moteur Stirling à faible écart de température en fait un système intéressant.

**2.4. Avantages, inconvénients et applications**



Le moteur Stirling ne semble pas être un moteur très connu du grand public du fait qu'on ne le retrouve pas dans des applications de tous les jours comme l'automobile par exemple. Il possède quand même certains avantages par rapport aux moteurs classiques mais également quelques inconvénients qui limitent justement son champ d'utilisation.

A la grande différence des moteurs à explosion, le moteur Stirling, lui, n'a aucune combustion interne, ce qui implique qu'il soit plus silencieux, qu'il vibre moins et qu'il soit moins polluant qu'un moteur classique, le peu de pollution causée venant seulement du mode d'alimentation en chaleur choisi. En plus de cela, il s'entretient facilement.

Concernant le rendement, celui-ci peut avoisiner les 40% contre 35% pour les moteurs à explosion.

De plus, comme son cycle est réversible, cela donne la possibilité de le convertir en pompe à chaleur si on le couple avec un autre moteur.

Enfin, l'un des principaux avantages vient de l'ensemble des possibilités qui lui sont offertes pour son mode d'alimentation (cela va de la combustion quelconque au solaire, en passant par la simple chaleur d'une main).

Ses principaux inconvénients concernent sa conception. En effet, ce moteur reste encore assez élevé en termes de coûts de fabrication, ce qui limite son intérêt chez certains industriels. Il est également plus difficile à concevoir qu'un moteur à combustion car ses pistons ont nécessairement une étanchéité plus importante que ceux d'un moteur à explosion et il pose aussi des problèmes de dynamique des fluides assez difficiles à résoudre.

De plus, c'est un moteur dont il est difficile de contrôler la puissance. Il souffre d'un manque de réactivité et l'augmentation de puissance est donc plus lente que pour un moteur à explosion.

Malgré cela, ce moteur possède des applications dans des secteurs où son coût ne représente pas un inconvénient trop important par rapport à ses avantages.

Les principaux champs d'utilisation sont le domaine industriel et militaire notamment en ce qui concerne la réfrigération de gaz ou de systèmes de guidage militaire infrarouge.

L'une de ses utilisations a longtemps été et reste celle de générateur d'électricité pour des missions scientifiques ou militaires dans certains milieux extrêmes comme les déserts.

Il est aussi utilisé dans certains sous-marins en tant que propulseur principal mais aussi dans le domaine spatial où il sert de fournisseur d'énergie aux satellites et sondes spatiales en complément des panneaux solaires.



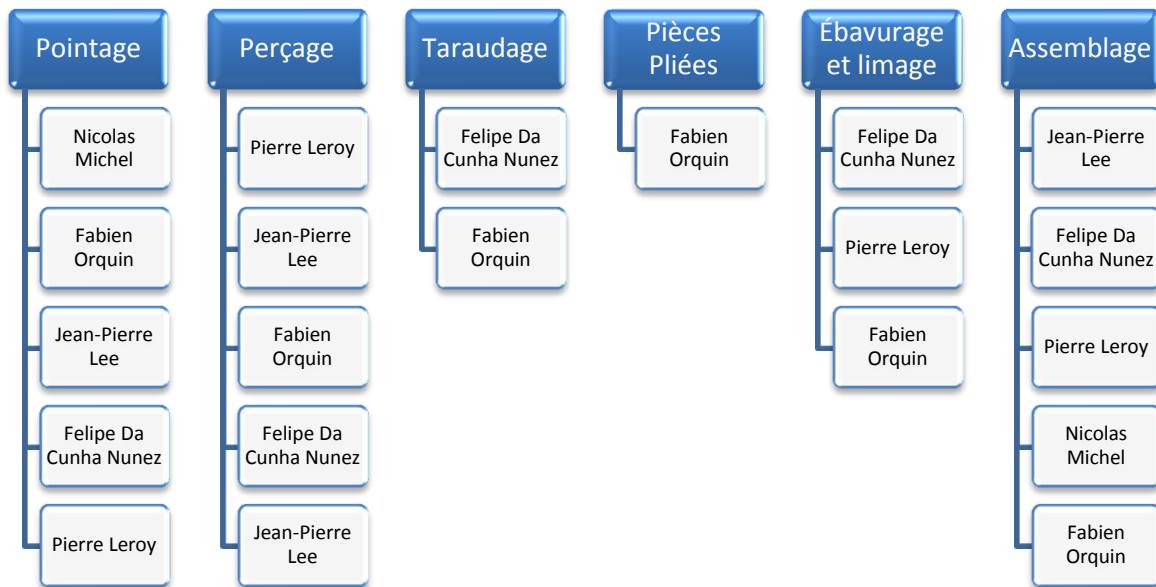
On peut peut-être espérer un jour retrouver ce type de moteur dans des applications plus larges comme l'automobile où il a quand même fait une apparition sur une voiture américaine qui ne fonctionnait malheureusement pas faute de pouvoir contrôler la puissance du moteur. Il est donc tombé dans l'oubli pour ce secteur. Cependant, les nouveaux enjeux environnementaux permettront peut-être un jour de relancer une recherche active sur ce type de moteur.



### 3. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour la méthodologie et l'organisation du travail, nous ne sommes pas partis d'un principe de rapidité mais plutôt d'apprentissage pour toute l'équipe c'est pourquoi nous avons chacun participé à toutes les tâches. Nous n'avons pas prévu un rôle précis pour chaque personne. Nous nous répartissions les tâches à effectuer à chaque séance afin que chacun puisse changer d'activité et découvrir les différents outils et gestes. Cela a permis à ce que chacun puisse tirer un maximum d'enrichissement de ce projet.

Bien que nous ayons opté pour un système de découverte des différentes tâches, tout le monde n'a pas pu exécuter toutes les opérations. L'organigramme suivant montre quelles tâches ont été réalisées par quels étudiants :



Concrètement cette organisation nous a permis de fabriquer chaque pièce séparément et ainsi à chaque séance nous voyions le moteur avancer puisque nous avions une pièce ou deux de terminées.

En ce qui concerne la rédaction du dossier et la réalisation du power-point, nous nous sommes répartis les différents points à traiter puis nous avons tout mis en commun.



## 4. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

### 4.1. Pièces et matériaux associés

Afin de réaliser notre moteur Stirling de type gamma, Mr Dhaouadi nous a remis a kit contenant des pièces pré-usinés. Dans ce kit, les matériaux utilisés pour réaliser les pièces sont divers. On y retrouve de l'acier, de l'aluminium mais aussi du laiton ou encore du verre.

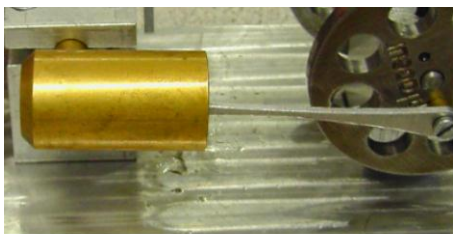
Le choix des matériaux pour les pièces est dans la plupart des cas directement lié à la fonction accordée à notre pièce. Ainsi il existe différents critères d'utilisation pour un matériau. Pour notre moteur par exemple, les principaux critères doivent être une résistance à la fatigue ou à l'usure élevée, avoir une bonne résistance aux variations de température, un coût de production faible, une grande facilité de production ou encore être compatible avec l'environnement et les éléments avec lesquels le matériau est associé.

Les matériaux de notre moteur ont donc été sélectionné pour leurs propriétés physique ou mécanique, mais aussi pour des raisons économique voir même esthétique.



Pour obtenir un radiateur efficace, c'est à dire un radiateur qui permet de bons échanges thermiques, on va donc le concevoir à partir d'aluminium. En effet, l'aluminium est un métal qui coûte peu cher et possède de bons propriétés : c'est un bon conducteur thermique, très léger mais aussi résistant. En plus, vu que le métal peut être facilement moulé et usiné on obtient aisément un radiateur ayant une grande surface de contact pour maximiser les échanges d'énergie. Pour des raisons de facilité d'usinage, la

plupart de nos pièces a donc aussi été conçue à partir de l'aluminium (la base du moteur, les bielles, le support pour les axes des roues, le support pour le tube entre le radiateur et le piston moteur).



Le piston moteur sera lui soumis à des frottements et doit donc être résistant à l'usure. Il sera donc réalisé en laiton puisque ce matériau est résistant à l'usure et facile à usiner. Et c'est pourquoi les douilles de notre moteur qui subissent aussi de nombreux frottement seront aussi faites à partir du laiton.

Les roues sont en acier percé pour mieux observer la vitesse à laquelle le moteur tourne. L'acier plus lourd que l'aluminium permet de créer plus facilement un effet d'inertie lors du démarrage du moteur.



## 4.2. Usinage et assemblage du moteur

### 4.2.1. Découverte des éléments

Nous avons tout d'abord découvert un moteur Stirling déjà fabriqué afin de nous donner un aperçu des différents usinages que nous aurions à réaliser et du travail d'assemblage qu'il faudrait effectuer. Pour fabriquer notre moteur, nous disposions d'un kit de pièces qu'il fallait usiner : un support en aluminium supportant l'ensemble du moteur, deux roues en acier, l'axe de ces roues, deux pièces d'aluminium (une servant de bloc moteur et une supportant les roues), un piston mécanique et son cylindre, un radiateur en aluminium, le tuyau de refoulement, une plaque d'aluminium dans laquelle découper les bielles, des tiges en métal à plier, une enceinte en verre et son joint d'étanchéité, de la paille de fer, les bagues de frottement en laiton, et toutes les vis nécessaires pour la fixation.

### 4.2.2. Etapes d'usinage (voir également l'annexe 1 pour la gamme d'usinage)

Nous avons découvert la liste des usinages et immédiatement commencé les opérations. La première pièce à usiner était le support en aluminium. Cela nous paraissait évident de commencer par cette pièce car c'est une pièce plane en aluminium donc une des plus faciles à percer, et cela nous permettait de découvrir notre outil principal : la perceuse à colonne. Comme pour tous les perçages à réaliser, nous procédions de la même façon :

- On commençait par prendre les côtes et tracer l'emplacement du perçage grâce à une pointe à graver.
- On procédait ensuite à un marquage pour guider le futur perçage.
- On perçait d'abord à un diamètre inférieur et on augmentait par pas de 1 à 2 mm jusqu'au diamètre définitif.
- Il restait ensuite à ébarber les surfaces percées, voire à réaliser un chanfrein pour l'emplacement de la tête des vis.

Pour les perçages, il fallait régler la machine afin d'obtenir la fréquence de rotation adaptée. Celle-ci se calcule ainsi :  $N = (V_c * 1000) / (\pi * D)$  avec :

- N : fréquence de rotation
- $V_c$  : vitesse de coupe
- D : diamètre

Nous avons ensuite procédé au perçage des autres pièces à surfaces planes. Concernant les roues, il fallait utiliser un support adapté afin de fixer efficacement les pièces dans l'étau et ne pas les déformer. Pour ces pièces, les perçages sur la plus grande surface étaient optionnels car cela n'affectait apparemment pas le bon fonctionnement du moteur. Nous avons cependant pris la décision de les réaliser afin d'alléger le plus possible le moteur car ces roues sont en acier, un métal beaucoup plus lourd que l'aluminium. Il a donc fallu être prudent et patients dans l'usinage de ces pièces en procédant à plusieurs étapes de perçage afin de ne pas casser les forets. L'acier est en effet plus résistant que l'aluminium.



Figure 1 Etat d'une roue avant et après usinage



Il restait donc à réaliser le perçage des pièces cylindriques, un usinage plus difficile que pour les pièces planes car il fallait veiller à bien fixer la pièce dans l'étau. Pour certains perçages, il fallait réaliser un filetage en procédant en 3 étapes avec 3 tarauds différents (du plus simple au plus précis). On utilisait pour cela un outil appelé tourne-à-gauche dans lequel on fixait le taraud. Une fois de plus, il fallait être plus attentif dans le taraudage des pièces en acier afin de ne pas casser les tarauds. On utilisait notamment un lubrifiant pour faciliter cette opération.

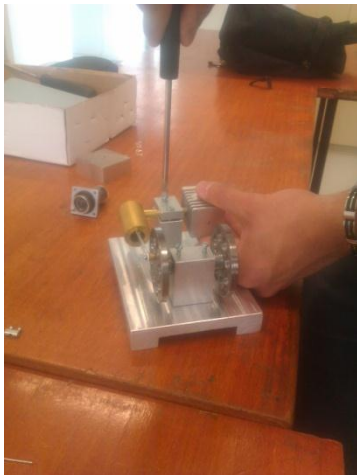


**Figure 2** Obtention d'une bielle à partir d'une plaque métallique

En parallèle des derniers perçages, nous avons procédé au pliage des tiges en acier grâce à une pince plate. Les derniers éléments à fabriquer étaient les bielles et cela était une étape plus délicate à réaliser. En effet, faute d'outil de précision nécessaire pour donner une forme adaptée aux bielles, il a fallu tracer les pièces sur la plaque d'aluminium et ensuite procéder à plusieurs perçages successifs autour de ce traçage pour obtenir une forme grossière de ces pièces. Il fallait ensuite donner la forme souhaitée en usinant les côtés grâce à un touret à meuler. Cette méthode reste peu précise et assez longue dans le temps mais le résultat reste très satisfaisant.

#### 4.2.3. Assemblage final

Les dernières séances ont été consacrées à l'assemblage du moteur qui a finalement été une étape moins longue que nous avons imaginé. Tout ce qui constituait des phases de vissage s'est fait rapidement mais la phase de fixation entre le cylindre mécanique, le tuyau de refoulement et le radiateur était plus délicat car il fallait encastrer le tuyau dans les deux autres pièces en prenant soin de les enfoncer jusqu'au bout et de ne pas déformer le tuyau.



**Figure 4** Phase d'assemblage du moteur



**Figure 3** Cylindre de refoulement (paille de fer et enceinte en verre)

Il a également fallu réaliser précisément le cylindre de paille de fer afin d'assurer une étanchéité parfaite au niveau de l'enceinte en verre.

La dernière phase consistait à lier tous les éléments du moteur entre eux par l'intermédiaire des bielles et des tiges métalliques.





### 4.3. Problèmes et résolution

#### 4.3.1. Dans l'assemblage

Un des problèmes a été l'encastrement du tuyau de refoulement dans le cylindre mécanique. Alors que l'encastrement dans le radiateur était simple, celui dans le cylindre s'est avéré compliqué, justement dû à la forme de ce dernier. Il était en effet difficile de fixer correctement la pièce dans l'étau puisqu'elle glissait quand nous tentions d'encastrer le tuyau orthogonalement dans celle-ci. Nous avons ainsi dû demander de l'aide à Mr Dhaouadi qui est finalement parvenu à réaliser cet assemblage.

Un autre problème concernait le pliage de la paille de fer en une forme cylindrique. Nous avons en effet dû effectuer un second essai avec un nouveau morceau de paille de fer car le premier n'avait pas abouti à ce que nous souhaitions. Le problème venait du fait que la tige de fer avait un léger mouvement à l'intérieur de la paille de fer lorsque celle-ci se déplaçait dans l'enceinte en verre, ce qui risquait de poser un problème pour le bon fonctionnement du moteur. Nous avons donc coincé la tige dans la paille en prenant soin de serrer le plus possible au début de l'enroulement de la paille.

#### 4.3.2. Démarrage du moteur

Après avoir terminé l'assemblage, nous avons tenté de démarrer le moteur, sans succès. Nous ne nous attendions pas à ce qu'il marche du premier coup car il faut toujours un temps de rodage. Nous avons donc tenté de réduire au maximum les frottements là où on pensait qu'ils étaient présents, c'est-à-dire dans le cylindre mécanique au niveau du piston mais également au niveau de l'axe des roues. Cela n'a malheureusement pas permis au moteur de mieux démarrer.

Nous pensons donc qu'il existe peut-être un manque d'étanchéité au niveau du tuyau de refoulement ou de l'enceinte en verre malgré la présence du joint. Nous avons donc pensé qu'il serait judicieux de coller le tuyau de refoulement aux deux autres pièces. Peut-être que nous le ferons à la toute dernière séance si le moteur ne démarre toujours pas.

En effet, nous avons identifié un problème qui peut fortement être responsable du dysfonctionnement : la tige métallique faisant le lien entre la bielle et le morceau de paille de fer est peut-être la cause d'un léger blocage au niveau du radiateur. Nous avons donc pris la décision de la refaire à la dernière séance, en espérant que le problème du démarrage sera résolu. Nous avons néanmoins pu voir le moteur en fonctionnement grâce à celui qui nous a servi de modèle tout au long des séances. Malgré le fait que ce moteur ait déjà fonctionné de nombreuses fois auparavant, il lui a quand même fallu un temps de rodage assez conséquent.

### 4.4. Résultats

Finalement notre moteur n'a pas fonctionné comme on l'aurait souhaité. En effet nous avons manqué de temps pour régler tous les problèmes d'étanchéité et d'ajustement.

Enfin vu de notre résultat, nous pouvons envisager quelques améliorations possibles :

- Un système de lubrification automatique
- Un système de refroidissement plus efficace afin d'augmenter le rendement
- Une source de chaleur plus efficace afin d'augmenter le rendement.



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le moteur Stirling gamma est une machine fascinante de complexité mais aussi de simplicité à la fois. Avec une efficacité impressionnante, il peut être utilisé dans bon nombre d'industries, sa réalisation dans le cadre d'un projet était donc une tâche idéale dans notre initiation au monde de la fine mécanique.

Vu la difficulté de la réalisation d'une telle structure, il est évident qu'une bonne répartition du travail était indispensable. Selon nos prédispositions à la mécanique et nos compétences respectives, nous avons permis à chacun de pouvoir participer pleinement à ce projet. Un projet qui a été pour certains un avant-goût de leurs prochaines années en département, et pour d'autres un bagage supplémentaire dans leur apprentissage des sciences appliquées.

En termes de résultats, on peut dire que ce projet a globalement tenu ces promesses malgré les différents problèmes rencontrés. En effet, après des semaines de travail, la fabrication du moteur Stirling gamma a été réalisée avec succès et cela grâce à l'encadrement de Monsieur Faouzi Dahouadi, une aide qui a été indispensable face aux difficultés rencontrées au fur et à mesure que notre travail avançait. Et pour cela, nous tenons à le remercier pour ses précieux conseils.

### 5.1. Conclusions personnelles

#### **Jean-Pierre Lee :**

La réalisation d'un moteur Stirling m'a permis d'effectuer un projet concret et intéressant. En effet, au semestre précédent, on étudiait des diagrammes d'énergie mais cela m'avait paru un peu abstrait. Bien qu'on n'ait pas réalisé le moteur à partir de rien, puisque nous sommes partis d'un kit avec des pièces à moitié finies, la réussite de l'assemblage à la fin du projet m'a vraiment fait plaisir. Ce projet comme tous les autres aura une nouvelle fois contribué à améliorer notre travail en groupe, mais ce que je retiendrais de ce projet c'est que même l'assemblage d'un moteur aussi petit est difficile donc ceux des chaînes de production sont encore plus compliqués.

#### **Fabien Orquin :**

Ce projet sur le moteur Stirling a été pour moi un projet assez intéressant dans l'ensemble. Cela a notamment été l'occasion de se remémorer quelques aspects de la thermodynamique étudiée au second semestre.

J'ai trouvé très utile le fait de s'occuper de l'usinage des pièces ainsi que de leur assemblage. Je regrette cependant le fait que le moteur soit en kit et que l'on n'ait donc pas une totale liberté dans le choix des pièces, de leur disposition et du mode de fonctionnement. Je suis quand même conscient que cela peut être dû au manque de temps dont nous disposons pour réaliser ce projet.

Malgré cela, ce projet restera pour moi un bon moyen d'effectuer un travail en groupe, ce qui ne peut être que bénéfique.



**Felipe Da Cunha Nunez :**

Désireux d'entrer en département énergétique et propulsion, projet 19 de réalisation d'un moteur Stirling de type gamma m'a tout de suite paru être une bonne opportunité de mettre en avant mon goût pour les moteurs et la thermodynamique dans un cadre pédagogique différent.

En effet, notre projet est surtout basé sur le côté pratique de la réalisation avec l'usinage et l'assemblage des pièces une par une. Bien que notre projet a été accompagné d'un minimum de réflexion théorique essentiel à la compréhension du mode de fonctionnement de la machine, la partie manuelle en équipe s'est réalisé dans une bonne humeur générale tout simplement parce que c'est une tâche agréable.

Enfin, monsieur DHAOUADI a su nous accompagner tout au long de notre démarche en mettant en évidence toutes les étapes nécessaires à l'élaboration et la bonne coordination de notre projet tel que :

- documentation et recherches sur le moteur stirling,
- cahier des charges et analyse fonctionnelle,
- études des plans de conception afin d'établir une gamme d'usinage,
- usinages des pièces,
- assemblage,
- expérimentation.

**Pierre Leroy :**

J'ai beaucoup appris durant ce projet tant sur le plan technique que sur le plan humain. J'ai appris à me servir d'outils comme du tourne-gauche que je ne connaissais pas, etc. J'ai apprécié travailler en groupe : pouvoir confronter nos idées, se partager les tâches. Ce projet restera à mes yeux une très bonne expérience apportant un bon complément à la formation plutôt technique du département.

**Nicolas Michel :**

Ce projet de P6 m'a permis de travailler en groupe autour d'une passion, la mécanique. De plus comme nous étions deux groupes à travailler sur le moteur sterling, nous avons pu travailler ensemble sur certaines parties du projet. Ce projet était particulièrement captivant, car c'était la première fois pour ma part que je pouvais lors de ma scolarité toucher réellement à la mécanique et assembler un système mécanique.

**Hicham Belahmer :**

Pour ma part, le projet de fabrication d'un moteur Stirling m'a beaucoup apporté. En effet, moi qui suis limité en mécanique, j'ai pu améliorer mes connaissances lors des séances d'usinage et d'assemblage. De plus, l'encadrement de Monsieur Dhaouadi m'a permis de mieux assimiler le travail en groupe et de développer mes aptitudes au travail manuel, qui nécessite un soin et une précision considérables.



## 6. BIBLIOGRAPHIE

lien internet :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_Stirling](http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling) (valide à la date du 15/06/2012).

[http://leweb2zero.tv/video/alfred\\_42461927d59459f](http://leweb2zero.tv/video/alfred_42461927d59459f) (valide à la date du 15/06/2012).



## 7. ANNEXES

### 7.1. Gamme d'usinage

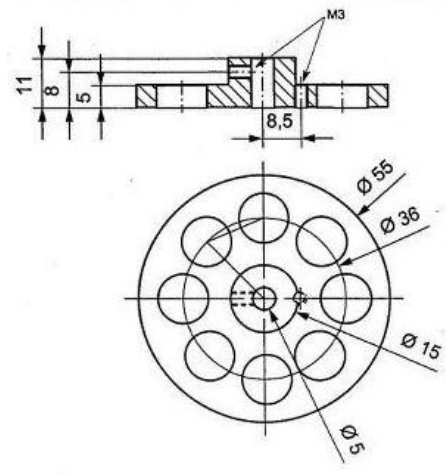
Gamme d'usinage		
Pièces et opération	Outillage et contrôles	Croquis
<b>Plateau de base</b>		
→ Perçages Ø4.1mm	Perceuse à colonne. Contrôle visuel et avec vis à tête conique M4	
→ Perçages Ø8 mm	Perceuse à colonne Contrôle visuel et avec vis à tête conique M4	
→ Ebarber la surface et briser les arêtes	Lime	
<b>Support moteur</b>		
→ Pointage	Pointeau manuel	<p style="text-align: right;">Vue de dessus (partie supérieure)</p> <p style="text-align: right;">Vue de devant (exécuté en une pièce)</p> <p style="text-align: right;">Vue de dessous (partie inférieure)</p>
→ Perçages Ø4,1 mm	Perceuse à colonne Contrôle visuel	
→ Taraudages M4	Tourne-à-gauche Contrôle visuel et avec vis à tête conique M4	
→ Ebarber les surfaces	Lime	
<b>Roue motrice du piston mécanique</b>		
→ Perçages Ø2,5 mm	Perceuse à colonne Contrôle visuel	
→ Taraudages M3	Tourne-à-gauche Contrôle visuel et avec vis à tête conique M3	
→ Pointage	Pointeau manuel	
→ 8 perçages Ø11 mm à espacement régulier	Perceuse à colonne Contrôle visuel	



→ Ebarber les surfaces      Fraise à ébavurer

**Roue motrice du piston de refoulement**

Opérations identiques à l'étape précédente      Outils et contrôles identiques à l'étape précédente

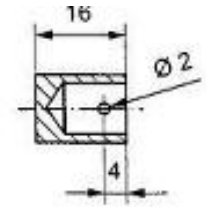


**Piston mécanique**

→ Pointage      Pointeau manuel

→ Perçage Ø2 mm      Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Ebarber la surface      Lime



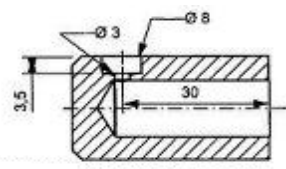
**Cylindre mécanique**

→ Pointage      Pointeau manuel

→ Perçage Ø3 mm      Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Perçage Ø8 mm      Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Ebarber la surface      Lime



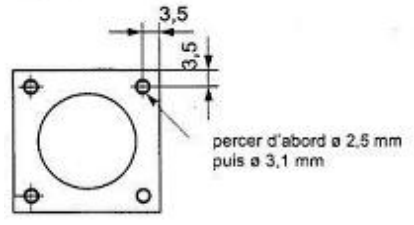
**Bride**

→ Pointage      Pointeau manuel

→ Perçages Ø2.5 mm      Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Perçages Ø3.1 mm après perçage du radiateur      Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Ebarber la surface      Lime



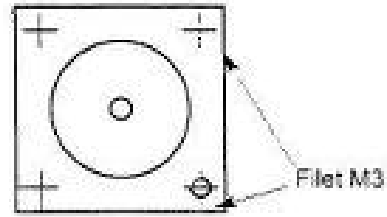
**Radiateur**

→ Perçages  $\varnothing 25$  mm  
(Prépercer d'abord grâce à la bride)

Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Taraudages M3

Tourne-à-gauche  
Contrôle visuel et avec vis à tête conique M3



→ Ebarber la surface

Lime

**Bielle motrice du piston mécanique**

→ Scier grossièrement la plaque d'aluminium et perçages successifs

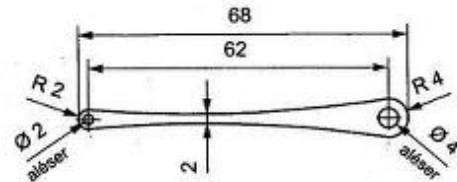
Scie à métaux  
Perceuse à colonne

→ Donner la forme et dimensions souhaitées

Touret à meuler  
Contrôle visuel

→ Ebarber

Lime



→ Perçage  $\varnothing 2$  mm

Perceuse à colonne  
Contrôle visuel

→ Perçage  $\varnothing 4$  mm

Perceuse à colonne

**Bielle motrice du piston de refoulement**

Opérations identiques à l'étape précédente

Outils et contrôles identiques à l'étape précédente

