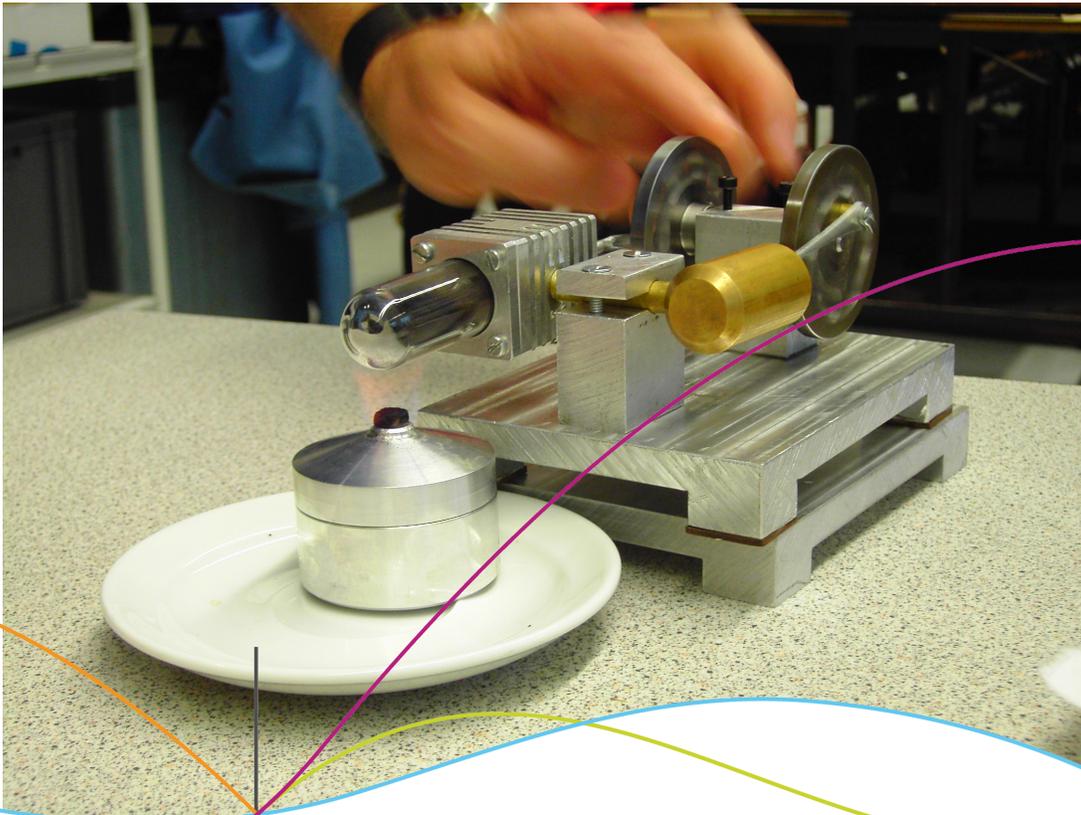


# Réalisation de moteurs à air chaud

## Moteurs Stirling Gamma



**Enseignant responsable :**  
Faouzi DHAOUADI

**Étudiants :**  
Julien BERNARD  
Benjamin BREBION  
Thomas COURSIN  
Moussa DIAKHITÉ

Sylvain LEGROS  
Pierre MALBOIS  
Maxime PATTYN  
Elie RECEVEUR  
Simon ROHOU



**Date de remise du rapport :** 17/06/2011

**Référence du projet :** STPI<sup>1</sup>/P6-3/2011 – 24

**Intitulé du projet :** 24 - Fabrication d'un moteur à air chaud (Stirling gamma)

**Type de projet :** Expérimental

**Objectifs du projet :**

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.

**Remerciements :**

Avant toute chose, nous tenons à remercier M. Dhaouadi pour nous avoir encadré tout au long de ce projet et pour avoir répondu à nos nombreuses questions.

---

<sup>1</sup>INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE ROUEN  
DÉPARTEMENT SCIENCES ET TECHNIQUES POUR L'INGÉNIEUR  
BP 8 –PLACE EMILE BLONDEL- 76131 MONT-SAINT-AIGNAN - TÉL : 33 2 35 52 83 00 - FAX : 33 2 35 52 83 69

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Théorie autour du moteur Stirling</b>	<b>5</b>
1.1 Aspect thermodynamique . . . . .	5
1.1.1 Les débuts du moteur Stirling : . . . . .	5
1.1.2 Fonctionnement du moteur Stirling gamma : . . . . .	6
1.1.3 Les autres types de moteurs Stirling . . . . .	8
1.2 Avantages et inconvénients du moteur Stirling vis-à-vis des moteurs à combustion interne . . . . .	12
1.2.1 Les avantages . . . . .	12
1.2.2 Les inconvénients . . . . .	12
1.3 Les applications du Stirling . . . . .	13
1.3.1 Les utilisations actuelles . . . . .	13
1.3.2 Les applications futures . . . . .	14
<b>2 Méthodologie, organisation du travail</b>	<b>16</b>
<b>3 Travail réalisé et résultats</b>	<b>18</b>
3.1 La commande des outils . . . . .	18
3.2 Liens entre théorie et pratique : justification du choix des matériaux . . . . .	18
3.3 L'usinage / la fabrication . . . . .	18
3.3.1 Le travail sur les pièces . . . . .	18
3.3.2 L'assemblage des pièces . . . . .	19
3.4 Les problèmes rencontrés lors de la fabrication . . . . .	20
3.4.1 Problèmes d'équipement . . . . .	20
3.4.2 Problèmes de mises en route . . . . .	20
3.4.3 Les autres problèmes . . . . .	21
3.5 Le résultat du projet . . . . .	21
3.5.1 Ce qu'on pensait faire / ce qu'on a fait / le résultat . . . . .	21
3.5.2 Améliorations envisageables . . . . .	22
<b>Conclusion</b>	<b>23</b>
<b>Conclusions personnelles</b>	<b>24</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>26</b>
<b>A Bon de commande d'outils</b>	<b>27</b>
<b>B Exemple de gamme d'usinage</b>	<b>28</b>

# Introduction

Lors du semestre 4, tous les étudiants de STPI ont l'occasion de réaliser un projet de physique. L'intérêt majeur d'un tel EC c'est qu'il permet à chacun, en plus de développer des connaissances scientifiques, de tester et d'améliorer des compétences qui seront nécessaires à un ingénieur : travailler en groupe (en l'occurrence nous étions 9) et donc s'organiser, se partager le travail mais également être autonome.

Parmi le large choix de sujets proposés, nous nous sommes orientés vers la fabrication de deux moteurs du type moteur Stirling gamma, l'un comportant une résistance chauffante et l'autre (c'était notre objectif) un générateur d'électricité. C'est un projet qui suscitait grandement notre intérêt puisqu'il nous permettrait d'une part d'observer concrètement ce que nous avons découvert en thermodynamique et d'autre part d'expérimenter le côté fabrication.

Afin de mener à bien ce projet, nous nous sommes réunis chaque semaine sous la conduite de M. Dhaouadi. Chaque séance était l'occasion de faire le point sur l'avancement de notre travail et sur la répartition des différentes tâches. C'est dans ce contexte que nous avons œuvré pour comprendre les principes du fonctionnement du moteur Stirling gamma et pour achever la fabrication des deux moteurs prévus.

# 1. Théorie autour du moteur Stirling

## 1.1 Aspect thermodynamique

### 1.1.1 Les débuts du moteur Stirling :

Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, avec la révolution industrielle, il était fréquent que surviennent des accidents avec des chaudières à vapeurs qui explosent. Ces accidents étaient dus à un manque de réglementation, mais surtout à une qualité médiocre des matériaux utilisés et à un problème de conception. En effet, les chaudières étaient soumises à des pressions trop élevées et elles n'arrivaient pas à le supporter. C'est pourquoi, un certain 27 septembre 1816, un pasteur écossais nommé Robert Stirling (1790/1878) a l'idée de déposer un brevet sur un moteur à fonctionnement relativement simple : le moteur Stirling.

Pour décrire le moteur Stirling simplement, on peut dire qu'il repose sur deux parties principales, un cylindre qui renferme un gaz et un piston dont le but est de récupérer l'énergie due à la détente et à la compression du gaz. Il base son fonctionnement sur une combustion externe, d'où son nom de « moteur à air chaud » ou « moteur à combustion externe ». En effet, le fluide enfermé dans le cylindre est de l'air soumis à une pression modeste et chauffé, détente, refroidissement puis compression.

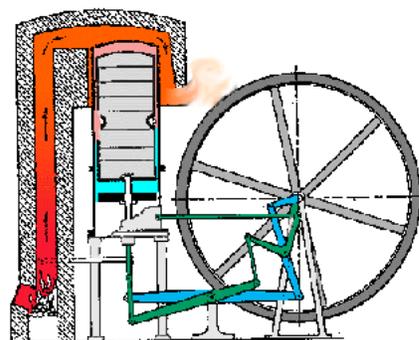


FIG. 1.1: Le moteur initial qui suit le cycle élémentaire suivant :

#### Le cycle élémentaire du moteur :

Le cycle thermodynamique de ce moteur est dans son principe relativement simple : il possède 4 phases pendant lesquelles le gaz utilisé dans le cylindre subit les transformations suivantes :

#### Un chauffage isochore (à volume constant) :

Le brûleur, autrement dit la source chaude, abandonne de la chaleur, donc de l'énergie thermique. Ainsi, on constate une augmentation à la fois de la température et de la pression à l'intérieur du cylindre durant cette étape. (La couleur bleue traduit ici une température faible et la couleur rouge une température élevée)

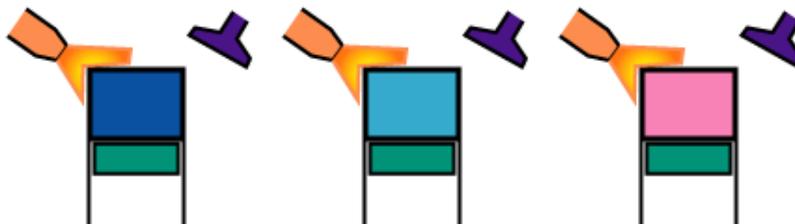


FIG. 1.2: Chauffage isochore

### Une détente isotherme (à température constante) :

Dans cette étape, on a la pression qui va diminuer. Or la température et la quantité d'air contenue dans le cylindre ne change pas. Donc pour conserver la loi des gaz parfaits, on a forcément une augmentation du volume. De plus, c'est cette augmentation de volume qui va produire l'énergie motrice du moteur.

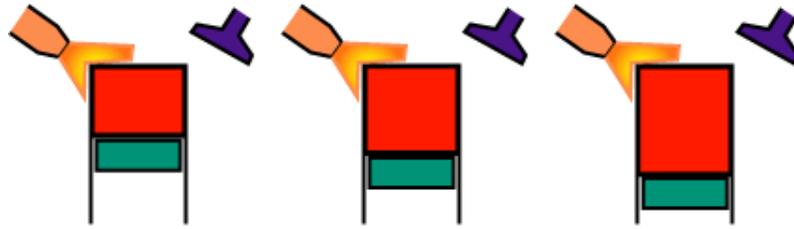


FIG. 1.3: Détente isotherme

### Un refroidissement isochore :

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

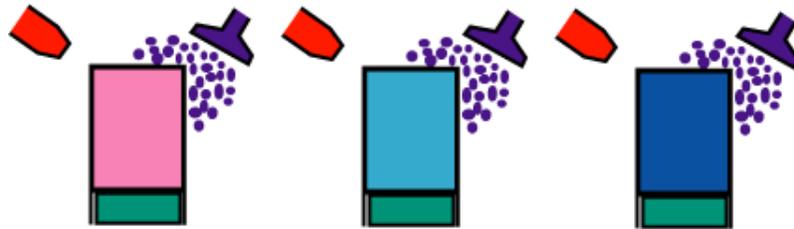


FIG. 1.4: Refroidissement isochore

### Une compression isothermique :

La température est constante, mais le volume diminue. Donc on a nécessairement une augmentation de la pression. Pour rendre cette étape possible, de l'énergie mécanique doit être apportée au gaz.

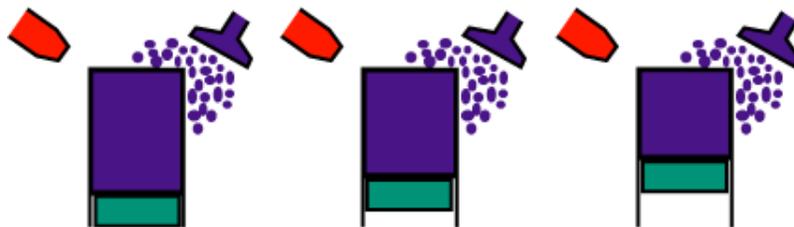


FIG. 1.5: Compression isothermique

## 1.1.2 Fonctionnement du moteur Stirling gamma :

Comme il a été dit précédemment, le principe du moteur Stirling a été inventé par Robert Stirling afin de trouver une alternative aux machines à vapeur de James Watt, dont les chaudières explosent trop fréquemment. Ces accidents ont motivé R. Stirling à se pencher sur l'élaboration d'un moteur fonctionnant en cycle fermé. Il dépose le brevet en 1816 mais ce n'est que bien plus tard, avec les progrès faits en études thermodynamiques, que

les physiciens comprendront son fonctionnement.

Le moteur gamma est le compromis entre le moteur type alpha et le moteur type bêta. Il est fréquemment utilisé pour mettre à profit de faibles écarts de température entre source froide et source chaude.

Le fonctionnement du moteur Stirling gamma est assez simple à comprendre. Le but est de transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique. Pour cela on fait travailler un gaz, le plus souvent de l'air mais cela peut être de l'hydrogène ou bien de l'hélium. L'air sera toutefois utilisé dans ce projet pour une raison pratique : il n'y a pas besoin de parfaire l'étanchéité du moteur pour contenir un gaz particulier dans le circuit. De faibles fuites sont permises, même si elles influent quelque peu sur le rendement du moteur. Ce gaz est soumis à quatre phases décrites ci-dessous :

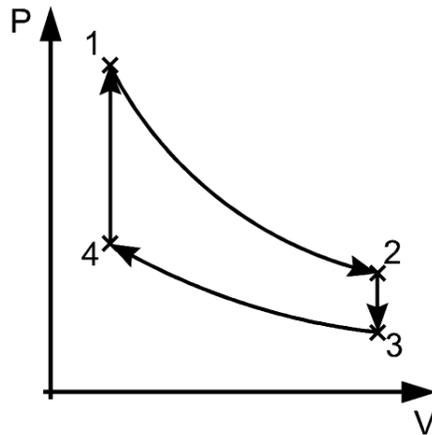


FIG. 1.6: Diagramme de Clapeyron du moteur Stirling

- **1** : Détente Isotherme : le gaz subit une détente quasi-isotherme absorbant la chaleur de la source chaude
- **2** : Refroidissement à volume constant (Isochore) : le gaz transfère sa chaleur
- **3** : Compression isotherme : l'espace de compression est maintenu à une température constante basse. Le gaz subit une compression quasi-isotherme et rejette de la chaleur à la source froide.
- **4** : Échauffement isochore : le gaz monte en température au contact de la source chaude.

Concrètement, on part d'un gaz avec une température faible. Il est chauffé par une source d'énergie : sa pression et sa température augmentent. Le gaz se dilate et pousse le piston : on a transformé l'énergie thermique en énergie mécanique ! Ensuite, il faut déplacer le gaz du côté chaud au côté froid du moteur (car le gaz ne peut pas se dilater indéfiniment), diminuant ainsi la pression. A ce point, on se sert de l'énergie mécanique précédemment transformée pour recomprimer le gaz et recommencer un nouveau cycle. La compression d'un gaz à basse pression nécessite moins d'énergie que ce que la dilatation du gaz fournit : on obtient donc un surplus d'énergie.

Le rendement du moteur Stirling gamma est exprimé selon :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (1.1)$$

où  $T_f$  est la température de la source froide, et  $T_c$  celle de la source chaude.

Il va sans dire que plus l'écart entre  $T_f$  et  $T_c$  est important, plus le rendement est proche de 1.

Il faut toutefois noter que ce rendement est uniquement valable dans le cas de l'utilisation d'un régénérateur qui récupérerait, au cours du refroidissement isochore, l'énergie nécessaire au réchauffement isochore. Ce régénérateur contribuerait donc grandement au recyclage de l'énergie. Il n'est cependant pas aisé de réaliser et d'installer ce type d'appareil pour des raisons d'encombrement ou bien d'utilisation de matériaux aux propriétés thermiques particulières.

L'expression du rendement sans régénérateur s'exprime alors :

$$\eta = \frac{R (T_c - T_f) \frac{\ln(V_{max})}{V_{min}}}{C_v (T_c - T_f) + R T_c \frac{\ln(V_{max})}{V_{min}}} \quad (1.2)$$

(sources : [www.moteurstirling.com](http://www.moteurstirling.com))

La source chaude doit bien évidemment être constamment alimentée en chaleur fournie par une source extérieure qui peut être une flamme ou bien une résistante chauffante par exemple.

### 1.1.3 Les autres types de moteurs Stirling

#### Le moteur alpha

Un Stirling alpha contient deux pistons de puissance séparés, un piston « chaud », et un piston « froid ». Le piston chaud est situé près de l'échangeur avec la plus haute température, et le piston froid est situé près du point d'échange de température la plus basse.

Inventé par l'américain Ericsson peu après l'invention du premier Stirling, ce type de moteur a un ratio puissance-volume très élevé, mais a des problèmes techniques, liés (fréquemment) aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints.

Assez performant au point de vue de la vitesse de rotation et de compression de ses 2 cylindres, son désavantage réside dans les importantes contraintes mécaniques infligées à chacun de ses pistons.

Ci-dessous un schéma de fonctionnement d'un moteur Stirling alpha :

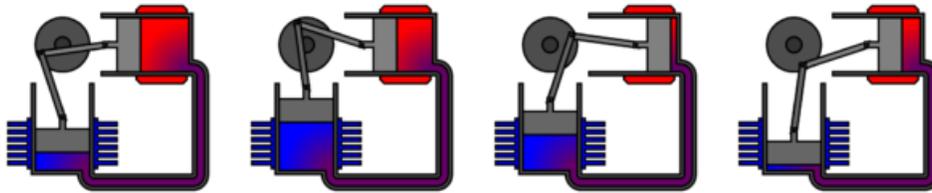


FIG. 1.7: Cycle d'un Stirling alpha

#### 1. Phase de chauffage :

Le gaz de travail est en contact avec la paroi chaude (en rouge) du cylindre de la partie chaude. Il est chauffé et voit donc son volume augmenter. L'expansion du gaz pousse le piston chaud au fond de sa course dans le cylindre (ici vers la gauche). Le piston chaud pousse grâce à la bielle le piston froid vers le bas. Le gaz froid remonte par le tuyau et concentre le gaz dans la partie chaude.

#### 2. Phase de détente :

Le gaz chaud est maintenant à son volume maximal. L'expansion du gaz ne peut plus se faire vers la gauche (piston chaud en bout de course), et se fait maintenant (à droite) vers le cylindre froid (en bleu), lequel est de 90° moins chaud. Le piston chaud (rouge) envoie la plus grande partie du gaz vers le piston froid. Le piston bleu

remonte, et par la bielle, pousse le piston rouge vers la droite, contribuant à la circulation du gaz vers le piston bleu. Dans le piston froid (bleu), la température baisse, et le volume du gaz diminue (il se contracte).

### 3. Phase de refroidissement :

Presque tout le gaz est maintenant dans le piston froid (bleu) et le refroidissement du gaz continue. La pression du gaz est à son minimum. Plus la différence de température entre les pistons est importante, plus les variations de pression sont fortes, et plus le moteur est puissant.

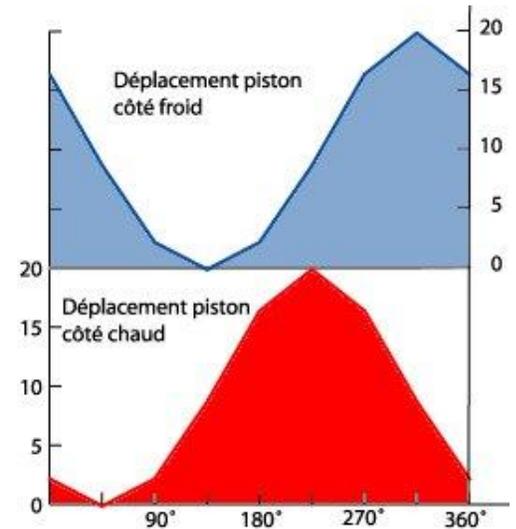
Pour maintenir le point froid, le piston bleu est entouré d'un système de dissipation thermique. Le piston froid, alimenté par l'inertie des pistons, commence à redescendre en re-compressant le gaz, et la pression du gaz recommence à augmenter.

### 4. Phase de compression :

Poussé par l'inertie des pistons en mouvement, le gaz remonte vers le cylindre chaud où il sera chauffé une fois de plus, recommençant le cycle.

Durant tout le cycle, les variations de volumes dans les différents cylindres sont importants et donc essentiels à comprendre, et leur évolution durant le cycle se fait suivant le graphique ci-contre.

Le cycle thermodynamique montre bien la performance d'un tel moteur, puisque le rendement constaté avoisine les 50%, bien qu'il s'éloigne fortement du cycle théorique d'un simple Stirling. On peut comparer les rendements générés par différents moteurs en regardant la surface occupée par le cycle, qui est représentative du travail récupéré durant un cycle.



### Le moteur beta

Un Stirling bêta utilise également un volume de gaz délimité entre deux pistons. Ces deux pistons combinent :

- Un mouvement relatif lors du changement de volume du gaz ;
- Un mouvement commun qui déplace ce volume de la partie chaude vers la partie froide, et vice-versa.

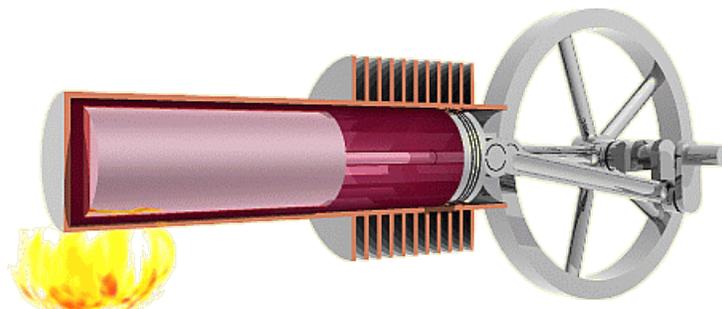


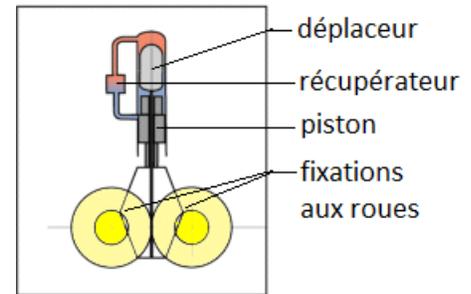
FIG. 1.8: Modélisation d'un Stirling bêta

Les volumes situés de l'autre côté des pistons ne sont pas fonctionnels. Sur l'illustration du haut de page, on aperçoit d'ailleurs l'orifice de communication de l'un de ces volumes avec l'extérieur. Les pistons sont donc tous les deux étanches. Le principe du moteur beta s'approche en réalité de celui du moteur gamma, à la différence que les deux zones chaudes et froides sont situées dans le même cylindre. Les avantages sont la compacité et l'absence de

perte aérodynamique ; les inconvénients sont la perte thermique par conduction, et aussi l'impossibilité d'utiliser un régénérateur.

Il existe des moteurs Stirling à pistons coaxiaux, qualifiés également de moteur Beta, dont l'un des deux pistons n'est pas étanche : il joue alors le rôle de déplaceur, et le volume situé au-dessus du déplaceur est fonctionnel. Ces moteurs s'apparentent donc aux moteurs Gamma décrits ci-après, mais sans volume mort.

Le système de fixation aux roues permet de récupérer l'énergie d'inertie des roues afin de repousser, par élasticité des « pattes », le piston et donc le déplaceur.



Par rapport au cycle idéal les phases du cycle d'un moteur type bêta sont moins différenciées.

### 1. Phase de chauffage :

Le gaz est transféré de la partie froide vers la partie chaude via la chaleur dispensée par le chauffage de la partie haute de la chambre, le gaz se dilate alors et repousse le déplaceur vers le bas.

Le piston moteur, lui, est quasi immobile.

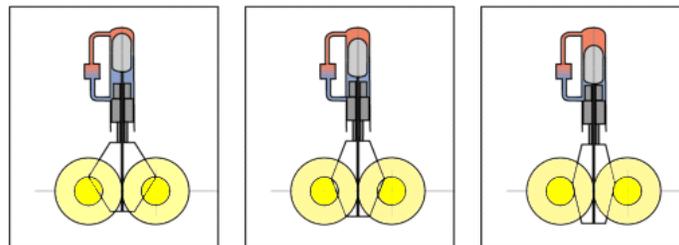


FIG. 1.9: Chauffage

### 2. Phase de détente :

Le gaz est détendu au niveau de la source chaude, et se dilate encore entrant dans la partie froide et poussant donc le piston moteur, qui fait tourner les roues via les « pattes ».

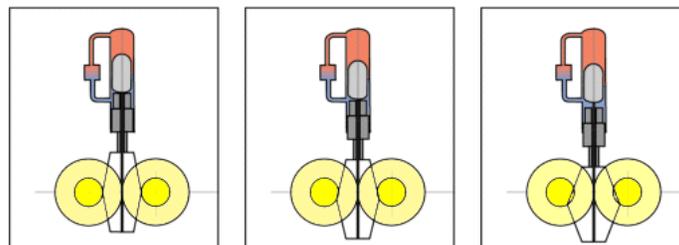


FIG. 1.10: Détente

### 3. Phase de refroidissement :

Le gaz est transféré de la partie chaude vers la partie froide et repousse donc d'autant plus le piston moteur

jusqu'au niveau minimum de sa trajectoire, ce faisant il repousse aussi vers le haut le déplaceur. La partie froide occupe alors de plus en plus de place, le gaz se refroidit et se contracte.

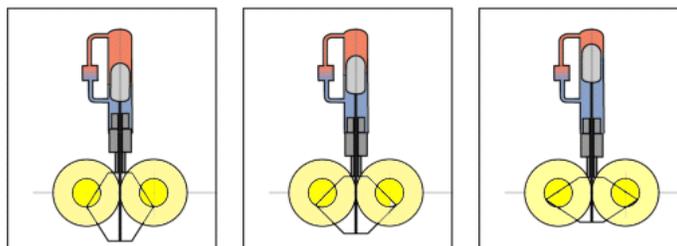


FIG. 1.11: Refroidissement

#### 4. Phase de compression :

Le gaz est comprimé en restant au droit de la source froide. Le piston moteur remonte alors par aspiration et grâce à l'inertie des roues via les « pattes », tandis que le déplaceur est quasi immobile en partie supérieure, repoussé par la quantité d'air froid.

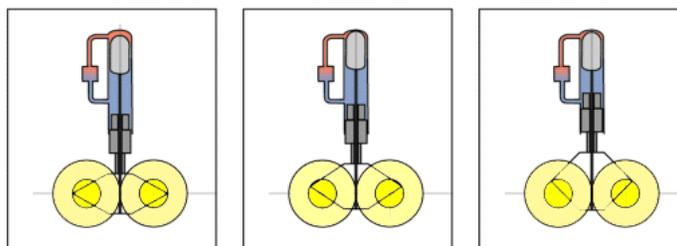


FIG. 1.12: Compression

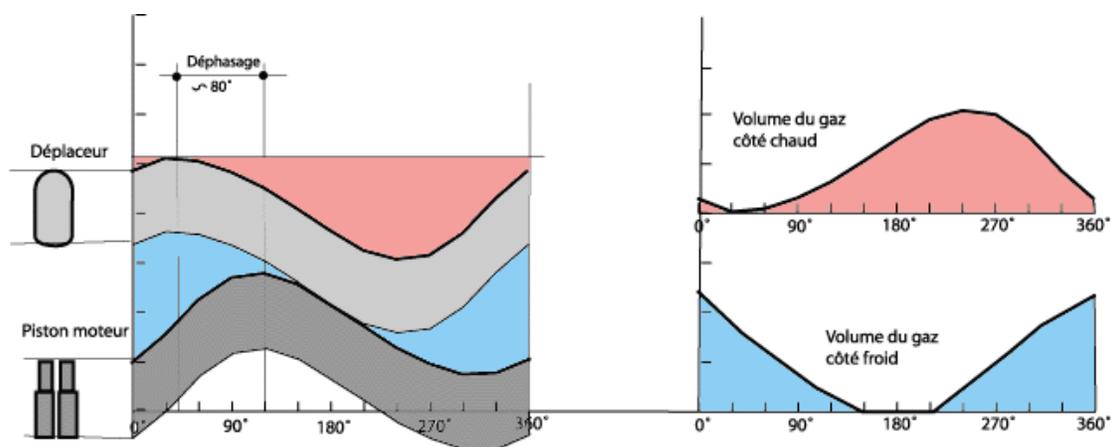


FIG. 1.13: Diagrammes des variations de volumes et de la trajectoire du déplaceur et du piston moteur

On observe que le déplaceur et le piston moteur sont déphasés et que les variations de volumes du gaz sont importantes.

## D'autres types moins répandus

On notera qu'il existe d'autres types de moteurs Stirling, moins connus, comme le Fluydine ou encore le Casiturbine.

## 1.2 Avantages et inconvénients du moteur Stirling vis-à-vis des moteurs à combustion interne

### 1.2.1 Les avantages

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe qui possède de nombreux avantages vis-à-vis des moteurs à combustion interne (cas du moteur Diesel par exemple). On peut citer :

- Son meilleur rendement par rapport à ses concurrents à combustion interne. En effet, il avoisine un rendement de 40% contre 35% pour les moteurs à explosion. Même si la différence de 5% peut paraître faible, cela représente tout de même 15% d'économie d'énergie. De plus, l'absence d'explosion dans le cas du moteur Stirling le rend plus résistant.
- Sa faible nuisance tant en matière de pollution que de bruit. Le moteur est en circuit fermé il n'y a donc pas de bruit d'échappement.
- Sa polyvalence en terme de sources énergétiques, il peut fonctionner avec diverses sources de chaleurs comme : du pétrole, du bois, du charbon, etc.
- Sa réversibilité, puisqu'il base son fonctionnement sur le cycle de Carnot, qui lui est réversible. Il peut tout aussi bien jouer le rôle d'une « pompe à chaleur » que d'un moteur.
- Sa facilité d'entretien en raison du peu de pièces utilisées et de l'absence d'échange de fluide comme dans un moteur Diesel par exemple.
- Sa valorisation d'énergie dite de « rebut », comme des gaz chauds ou bien la chaleur issue de perte par effet joule. Le moteur fonctionnant avec de faibles écarts de température il peut se servir de ces énergies pour fonctionner.

### 1.2.2 Les inconvénients

Malgré ces quelques avantages, le moteur Stirling demeure généralement absent dans le secteur industriel du fait de ses inconvénients :

- Un problème d'étanchéité récurrent difficile à contrôler.
- Un temps de réponse trop long dû à l'inertie thermique de ses sources chaudes et froides.
- Un problème de conception, puisque contrairement aux autres moteurs, le moteur Stirling utilise une source chaude externe. De plus, il utilise des gaz qui possèdent des propriétés d'isolants thermiques, donc les échanges de chaleur sont très lents.
- Une difficulté dans le changement de régime puisque ce changement ne peut s'effectuer qu'en agissant sur le taux de compression du fluide de travail. De même, comme il ne peut pas produire une puissance et un couple variable, il est délaissé par les industriels qui lui préfèrent les moteurs à combustion interne.
- Un prix trop élevé vu son manque d'utilité dans le secteur industriel.

## 1.3 Les applications du Stirling

### 1.3.1 Les utilisations actuelles

Les moteurs Stirling sont assez méconnus du grand public, ils sont rares donc coûteux au niveau industriel, c'est pourquoi ce sont principalement des domaines où les coûts du système ne constituent pas un inconvénient par rapport aux avantages que celui-ci est utilisé.

#### La recherche et le monde universitaire

Le moteur Stirling fait l'objet d'études théoriques et de travaux pratiques afin de mieux connaître son fonctionnement, d'améliorer son rendement et augmenter sa compétitivité vis-à-vis d'autres sources d'énergie. Ainsi d'un point de vue thermodynamique, ce moteur constitue plus ou moins l'application du cycle de Carnot. Son potentiel en fait une excellente source de recherche pour tout étudiant féru de mécanique des fluides, d'écologie, ou tout simplement curieux.

Ainsi la modélisation du moteur, son fonctionnement, sont fait via la mise en équation des échanges de chaleur, des écoulements des fluides et la simulation de certaines configurations sans à avoir à construire le moteur en question comme d'autres groupes le font sur SolidWorks.

Notre projet de physique en est quasiment l'exemple parfait : un autre groupe de projet se charge de la modélisation, tandis que nous nous chargeons de la construction de ce même moteur.

#### Les utilisations militaires

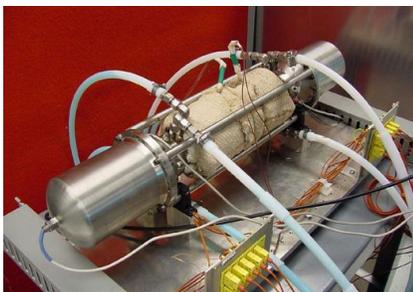
Le moteur Stirling est déjà présent dans des sous-marins suédois et australiens, il est soit utilisé en tant que moteur auxiliaire (sous-marins suédois), couplé au moteur principal ou bien il sert de système de refroidissement du réacteur nucléaire dans les sous-marins et porte-avions. Le silence relatif de ce type de moteur en fait une excellente alternative dans ce genre d'utilisation.



On peut également retrouver le moteur Stirling dans certaines frégates américaines ou dans les drones possédant une grande autonomie. Aussi son utilisation est généralisée dans les systèmes de guidages infrarouges des missiles.

#### Les utilisations scientifiques

La NASA fait partie des premières équipes scientifiques à avoir utilisé le moteur Stirling afin de substituer la production d'électricité, ainsi, l'utilisation d'un moteur Stirling en lieu et place des panneaux solaires pour alimenter les satellites a été étudié et testé. Le rendement est particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles. La source chaude est constituée par des radioisotopes.



Mais la généralisation de cette utilisation ne s'est pas faite car ces moteurs sont plus sujets à la casse que les panneaux solaires (présence de pièce mécanique mobile). C'est pourquoi ce moteur est plus souvent utilisé en complément des panneaux solaires par la NASA ainsi que d'autres agences spatiales. Des recherches sont actuellement faites par la NASA en coopération avec des universités :

#### L'ASC (Advanced Stirling Converter)

Il s'agit d'un système développé pour optimiser le rendement du moteur Stirling dans des utilisations spatiales. Les 30% de rendement ont été atteint, celui-ci est basé sur les mêmes technologies que les moteurs Stirling équipant les

satellites RHESSI de la NASA.

### Le SRG (Stirling Radioisotope Generator)

Développé par la NASA, la Stirling Technology Company et le département d'énergie. Celui-ci est développé pour les missions dans l'espace notamment pour de futures missions sur Mars, ce système équipera les Jeep automatiques. Son rendement est d'environ 23% et son utilisation permettra de diviser par 4 la quantité de radio-isotope utilisé par rapport à celle utilisée dans un générateur thermoélectrique utilisant ces mêmes radio-isotopes.

Dans les missions scientifiques où les conditions climatiques sont extrêmes telles que dans les déserts arctiques ou australiens, la production d'énergie est assurée par des ce type de moteur.

### Le monde industriel et la cryogénie

Dans la production industrielle, le moteur Stirling est idéal du fait de son rendement, étant réversible, il peut être utilisé pour pomper la chaleur. Bien utilisé, il permet de liquéfier les gaz et de faire de la cryogénie, technique extrêmement importante.

### Les utilisations diverses

Le constructeur MSI, a présenté un ventilateur de carte mère alimenté à partir d'un petit moteur Stirling, la chaleur produite par la puce permet de lancer le moteur. L'écologie, devenue importante est donc totalement respectée, de plus, le régime de fonctionnement du moteur Stirling varie en fonction de la température de la source de chaleur. Ce ventilateur est donc thermorégulé sans qu'il soit nécessaire de mettre en place de système électronique de mesure de température et de régulation de vitesse.



La **micro-cogénération** (il s'agit d'un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur, la chaleur étant issue de la production électrique) est utilisée avec le moteur Stirling. Elle permet d'atteindre un rendement énergétique proche de 100% et elle est utilisée par la plupart des grands constructeurs de chaudières. Ainsi, en plus de chauffer l'eau, de l'électricité est produite localement.

## 1.3.2 Les applications futures

### Dans le domaine militaire

On peut prévoir la généralisation de l'utilisation du moteur Stirling pour les sous-marins et bateaux de surface comme source auxiliaire en production d'électricité comme c'est déjà le cas dans la marine suédoise et la marine australienne. En ce qui concerne le combustible à utiliser, l'oxygène et l'hydrogène sous forme liquide semblent être les plus adaptés.

### Dans la marine marchande ou de plaisance

Si la généralisation du moteur Stirling se fait dans le domaine militaire peut-être peut-on espérer l'intégration de celui ci dans le domaine de la marine marchande ou de plaisance comme source auxiliaire d'énergie électrique ou de chauffage. On pourrait aussi envisager son utilisation en tant que moyen de propulsion. On retrouve les atouts majeurs du moteur au niveau du silence et des vibrations.

### Dans le domaine industriel

Beaucoup de processus industriels rejettent de grosses quantités d'énergie et de pollution dans l'environnement surtout les industries dans les secteurs de production d'électricité et secteurs chimiques. Les moteurs Stirling pourraient donc constituer une motivation importante en matière de protection de l'environnement pour ces secteurs.

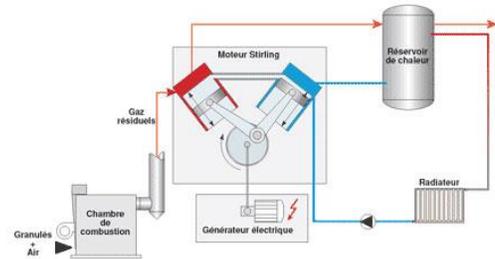
D'après des études, une centrale nucléaire enverrait deux fois plus d'énergie dans la nature que dans ses fils électriques ! Sachant que les fils électriques il y a encore une perte de 7% de l'énergie. Ceci montre bien l'intérêt de l'utilisation d'une cogénération et de la production d'énergie le plus près possible du consommateur qui se ferait en fonction de ses besoins de façon à éviter les pertes inutiles.

### Dans le domaine automobile

Etant donné la nécessité de changer de source d'énergie dans l'automobile, on peut espérer que le moteur Stirling fasse l'objet de plus de recherche afin de le généraliser. En effet, son excellent rendement, son aptitude écologique, son silence, sa durée de vie et sa simplicité en fait l'alternative idéale à nos moteurs à combustion interne. Toutefois, l'éclosion du moteur Stirling dans ce domaine dépend des fonds alloués à la recherche de techniques nouvelles.

### Dans le domaine domestique

C'est dans ce domaine que la plus haute croissance des moteurs est attendue notamment dans la fabrication d'électricité individuelle, ainsi que le chauffage pour sa maison et son eau chaude sanitaire. Sachant que, de nos jours, l'énergie résidentielle représente 8% de la production totale, le potentiel de marché est énorme.



Avec le moteur Stirling et des énergies primaires telles que le soleil avec des paraboles, le bois ou encore des déchets divers, le rendement en cogénération pourrait presque atteindre les 100%.

On peut aussi remplacer la production d'électricité nécessaire au fonctionnement des congélateurs et réfrigérateurs par le cycle du moteur Stirling plutôt que celui utilisé traditionnellement, c'est-à-dire le cycle de Rankine. Aujourd'hui, ils représentent le quart de la consommation d'électricité : en changeant le cycle, d'importantes économies pourraient se faire.

Aussi le moteur Stirling pourrait être envisagé pour le chauffage ou bien la climatisation, qui, comme chacun le sait, sont des utilisations très gourmandes d'un point énergétique. De plus il peut s'utiliser de façon autonome ou bien au sein d'un réseau d'électricité ou le particulier pourrait vendre ou bien acheter son électricité en fonction de ses besoins.

## 2. Méthodologie, organisation du travail

Pour la méthodologie et l'organisation du travail, nous avons décidé de réaliser ce projet comme si nous étions membres d'une entreprise et que nous devions construire le moteur. Nous avons eu accès au dossier de montage; nous avons alors fait la liste des éléments susceptibles de manquer pour le montage ou bien pour l'outillage et nous avons émis un bon de commande, en calculant les coûts de ces achats de matériel (voir *annexe A*).

Nous nous sommes ensuite divisés le travail un peu à la manière d'une chaîne de production pour essayer d'optimiser le temps que nous avons et que tout le monde participe équitablement au projet. Nous nous sommes donc séparés en plusieurs sous groupes indépendants comme décrit ci-dessous dans l'organigramme de notre organisation :

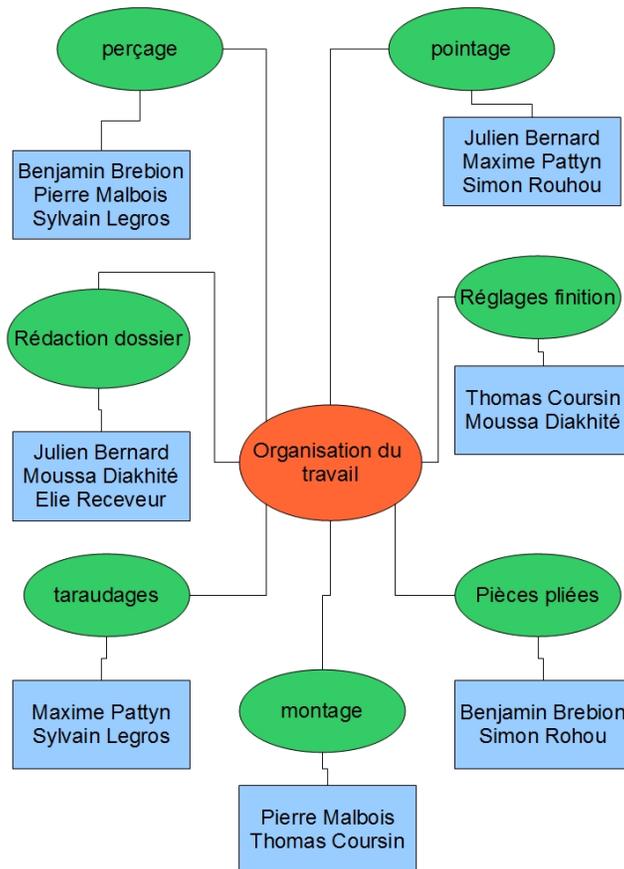


FIG. 2.1: Organisation du travail au sein du groupe

Concrètement, l'équipe de pointage pointait les pièces selon les plans préalablement établis dans le dossier de montage, ensuite, elle les transmettait à l'équipe qui perceait les pièces. Les pièces étaient, après, transmises à l'équipe s'occupant des finitions (ébavurage). Certaines pièces nécessitaient des traitements particuliers comme des taraudages, dans ce cas, elles étaient confiées à la personne en charge des taraudages avant d'être envoyées à la finition.

Etant nombreux dans ce projet, les personnes ayant joué leur rôle dans la fabrication pouvaient ensuite aider à la rédaction du rapport de projet.

Ce système de travail, nous a permis d'être productifs et de pouvoir réaliser deux moteurs au lieu d'un seul, tel que c'était initialement prévu. Une fois les deux moteurs fabriqués, nous nous sommes répartis l'écriture du dossier qui s'est faite rapidement grâce aux personnes déjà en charge de sa rédaction : le travail était déjà bien avancé. Nous nous sommes répartis comme suit :

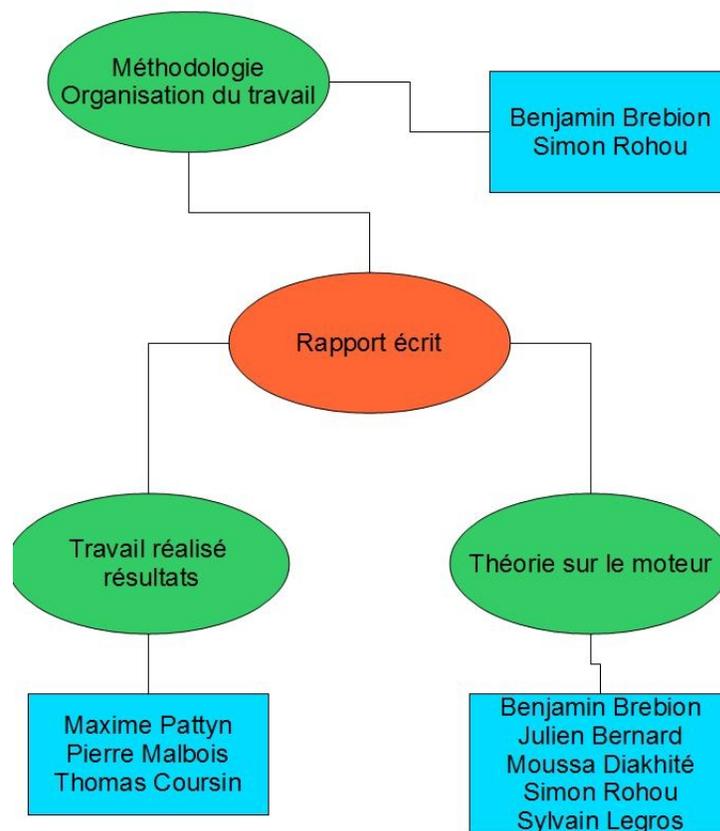


FIG. 2.2: Répartition des rôles pour l'écriture du rapport

## 3. Travail réalisé et résultats

### 3.1 La commande des outils

Avant de commencer l'usinage des pièces, nous avons dû commander certains outils qui n'étaient pas déjà présents dans l'atelier, à savoir : un compas à graver, un pointeau, des forets de perçage *M3* et *M4*, des tarauds pour réaliser les filetages, des têtes à chanfreiner, de la colle et de l'huile pour la lubrification. Voir l'*Annexe A*.

### 3.2 Liens entre théorie et pratique : justification du choix des matériaux

Le rendement du moteur peut être amélioré en augmentant l'intervalle de température entre la source chaude et la source froide. Cela se traduit en pratique par un contact de flamme important ou une résistante chauffante puissante, devant un radiateur efficace pour abaisser la température du gaz autant que possible. Des installations telles qu'un radiateur hydraulique peuvent être envisagées, bien que plus difficiles à mettre en place. Nous nous contenteront dans ce projet d'une pièce en aluminium (pour une bonne conductivité thermique) ayant une grande surface de contact pour maximiser les échanges d'énergie.

Le piston moteur est réalisé en laiton car il s'agit d'un matériau qui présente d'excellentes propriétés mécaniques. Il est notamment particulièrement résistant à l'usure et aux frottements : des contraintes auxquelles ce piston sera soumis. Pour les mêmes raisons, les paliers qui facilitent la rotation de l'arbre des deux roues sont réalisés dans le même matériau.

Dans un souci esthétique et pour des raisons économiques, on utilisera du verre (un tube à essai) pour le cylindre à combustion, qui remplit les fonctions de source chaude. Les roues sont réalisées en acier : on choisit un matériau lourd pour créer un effet d'inertie. Les perçages ne sont là que dans un but esthétique et permettent d'apprécier plus facilement la rotation de l'ensemble. Enfin, les bielles et les pièces cubiques qui servent à maintenir les éléments du moteur au bâti sont réalisés en aluminium pour faciliter leur usinage (perçage, taraudage et découpage à la main). Le bâti, pré-usiné, sera en acier.



FIG. 3.1: Le radiateur en aluminium

### 3.3 L'usinage / la fabrication

#### 3.3.1 Le travail sur les pièces

Pour réaliser notre moteur Stirling gamma, nous avons utilisé un kit contenant : le support en aluminium, deux blocs d'aluminium pour tenir le bloc moteur et les roues, des tiges en métal, 2 plaques en métal pour usiner les bielles, le piston et son enceinte, le tuyau de refoulement, le bloc moteur en aluminium, une enceinte en verre et son joint d'étanchéité, de la paille de fer, les bagues de frottement en laiton, les roues brut en acier, l'axe des roues en acier et toute la visserie nécessaire.

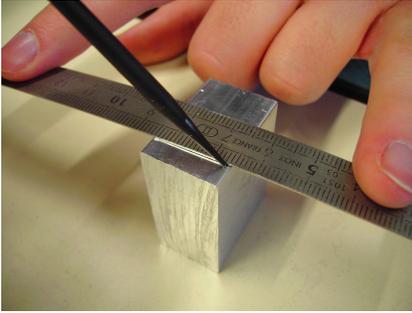


FIG. 3.2: Prise de côtes avant pointage

Nous avons tout d'abord commencé par usiner les grosses pièces afin de nous familiariser avec les machines et notamment la perceuse. Donc nous avons percé les trous dans les blocs et le support en aluminium. Le procédé était toujours le même : on commence par graver l'endroit où l'on doit percer, puis on crée une marque de guidage pour le foret à l'aide du pointeau. Ensuite, on commence avec un trou assez petit (environ 2mm) et on augmente par pas de 1 à 2 mm jusqu'au diamètre souhaité. Parfois, il fallait en plus réaliser des chanfreins pour la tête des vis.

Certaines pièces nécessitaient un filetage. Celui-ci était réalisé à l'aide des tarauds que l'on utilisait dans l'ordre de précision du filetage (le premier étant grossier et le troisième précis). Cette opération était plus facile en rajoutant un lubrifiant.

Nous avons ensuite usiné les roues en acier ce qui n'a pas été fait sans difficulté à cause de la solidité du matériau comparé aux pièces en aluminium. Pour le perçage des roues, nous avons utilisé un étau de la forme des roues pour les maintenir correctement et éviter que les pièces ne soient marquées par le serrage. Pendant ce temps, les tiges du déplaceur ont été fabriquées par pliage avec une pince. Cette opération nécessitait une grande précision car les tiges devaient être les plus parfaites possibles afin de limiter un maximum les frottements.

Nous avons aussi usiné les bielles à l'aide de 2 méthodes différentes. La première consistait à créer la forme désirée par perçage successif le long du contour la bielle. Mais cette technique est assez longue et nécessite de limer longuement la pièce pour enlever les aspérités. Nous avons donc essayé d'usiner la pièce à l'aide de la scie à métaux, cette méthode s'est révélée plus efficace et a donné un aussi bon résultat avec un peu moins de retouches à la lime. Pour cette opération, il aurait été sûrement plus judicieux d'utiliser un logiciel de CFAO afin d'avoir un meilleur rendu.

### 3.3.2 L'assemblage des pièces

L'assemblage du moteur s'est fait assez rapidement mais certaines étapes ont été plus délicates que les autres. Par exemple la pose de la paille de fer devait se faire de façon assez précise car il fallait qu'il y est assez de matière de façon à ce que le piston soit rempli entièrement mais sans que la paille ne touche l'enceinte en verre. Il a fallu également limer l'axe des roues sur toute sa surface car le diamètre de celui-ci était légèrement trop épais ce qui empêchait sa rotation à l'intérieur des bagues de frottement. Nous avons également collé le tube de refoulement avec le bloc moteur et le tube du piston ensemble afin d'assurer une étanchéité parfaite.

En revanche il a fallu effectuer de nombreux réglages afin que le moteur fonctionne ce qui n'as pas été évident. Il a fallu trouver toutes les causes principales de frottements notamment et les annuler en ajoutant de l'huile ou en retouchant certaines pièces comme les tiges reliant le déplaceur à la bielle, ou encore l'axe des roues.



FIG. 3.3: Les roues du moteur



FIG. 3.4: Opération de perçage

## 3.4 Les problèmes rencontrés lors de la fabrication

### 3.4.1 Problèmes d'équipement

Lors de la fabrication du moteur Stirling nous avons dû effectuer des perçages et par conséquent utiliser une perceuse. En effet, nous avons percé de nombreuses pièces en aluminium, cependant lorsque nous avons dû percer les roues en acier nous avons remarqué que la perceuse à notre disposition manquait de puissance malgré nos différents réglages sur la machine. Or nous n'avions pas accès à des perceuses plus puissantes, ce qui nous a ralenti dans la confection des roues. Pour éviter plus de retard l'enseignant responsable de notre projet, M. Dhaouadi nous a fourni une roue déjà allégée par les perçages.

De plus, la machine assistée par ordinateur qui devait nous servir pour faire les bielles était en panne. C'est pourquoi, nous avons dû trouver une solution alternative, autre que prendre une bielle déjà existante. Notre professeur nous a conseillé de faire plusieurs perçages, puis d'enlever la matière à l'aide d'une pince et de limer ensuite. En utilisant cette méthode nous avons réussi à obtenir les bielles aux dimensions voulues. Cependant l'aspect esthétique était bien en dessous de ce que l'on aurait pu obtenir avec une machine assistée par ordinateur.



FIG. 3.5: Gros plan sur le joint

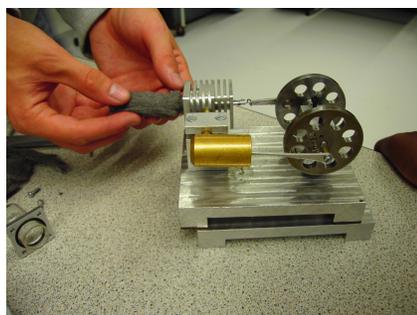


FIG. 3.6: Assemblage

Ensuite, avant de commencer à usiner nous avons commandé des outils, cependant certain de ces objets se sont cassés. Cela a été le cas pour une mèche que nous avons commandé en un unique exemplaire. Il nous a donc fallu redemander cette mèche ce qui nous a une nouvelle fois fait perdre du temps. En outre, nous avons également dû avoir un deuxième exemplaire du tube en verre, car lors d'une manipulation le verre s'est fêlé sous l'effet de la température de la flamme.

Enfin, nous avons eu d'autres soucis matériels car il nous manquait des pinces. Mais ce problème a été rapidement résolu car nous avons emprunté tout ce dont nous avions dans un autre laboratoire de physique.



FIG. 3.7: La tige et le tube en verre

### 3.4.2 Problèmes de mises en route

Lorsque le moteur fut terminé nous avons testé une première fois ce dernier pour voir si tout fonctionnait. Nous avons donc commencé à chauffer le gaz emprisonné dans le tube en verre. Puis nous avons essayé d'initier le mouvement en tournant une des roues du moteur. La première tentative fut un échec donc nous avons décidé d'éteindre la source chaude et de lubrifier les parties importantes du moteur c'est-à-dire le piston et la tige métallique pour diminuer les frottements et assurer l'étanchéité. De plus, on savait que le moteur devait se roder avant de fonctionner correctement. Cependant, malgré un certain laps de temps, le moteur ne fonctionnait pas, car il y avait encore trop de frottement.

Nous avons donc réajusté notre montage, en ré axant les bielles. Nous avons finalement identifié le problème qui provenait d'un trop grand frottement entre la tige en fer et le radiateur. Nous avons donc démonté en partie le moteur pour limer cette tige en fer. Une fois, la tige limée et le montage opérationnel nous avons retenté l'expérience. Nous

avons réussi à entretenir le mouvement mais des frottements persistent ce qui réduit considérablement la vitesse que pourrait atteindre notre moteur.

### 3.4.3 Les autres problèmes

Lors des deux premières séances nous avons eu des problèmes d'organisation car nous cherchions chacun de notre côté ce qu'on pourrait faire. De plus, le fait que le groupe soit composé de 9 personnes a rendu la communication plus difficile. C'est pourquoi pour éviter que chacun ne se disperse nous avons décidé de faire une réunion systématique au début de chaque séance pour faire le point sur les avancés du projet.

Nous avons eu un problème de temps, en effet nous avons prévu d'améliorer notre moteur par rapport à celui de l'année précédente en y incluant par exemple un compte tour, une bague chauffante pour plus de sécurité.

## 3.5 Le résultat du projet

### 3.5.1 Ce qu'on pensait faire / ce qu'on a fait / le résultat

Le premier but de ce projet était de fabriquer un moteur Stirling gamma. Néanmoins, au vu de notre nombre pour ce projet, nous nous sommes plutôt orientés vers la fabrication de deux moteurs. De plus, dès le début du projet, nous avons en tête l'idée de faire plus que de simples moteurs. Nous avons envie de trouver une idée originale pour faire autre chose que simplement suivre les plans de fabrication. Nous avons alors fait quelques recherches, et trouvé quelques idées. Nous avons par exemple cherché dans nos anciens travaux pratiques de P6-2, ou sur Internet.

Ainsi, deux idées d'ajouts aux moteurs ont été retenues :

- Ajout d'une résistance chauffante en lieu et place de la flamme actuelle.
- Ajout d'une DEL, qui serait alimentée en ajoutant un alternateur sur les roues du moteur, permettant ainsi la production d'électricité.

Nous avons donc commencé la réalisation du moteur, et fait les calculs pour les parties électriques.

Nous nous sommes efforcés de faire de notre mieux pour réaliser ce moteur. La première chose que nous avons donc faite a été de nous répartir le travail. Tandis que certains avaient pour tâche de commencer le dossier et les recherches qu'il nécessitait, d'autres s'attelaient aux tâches manuelles.

Nous avons donc mené des recherches sur le moteur Stirling : son mode de fonctionnement, son histoire, ses utilisations. Ces recherches nous ont permis de mieux comprendre ce que nous faisons, ainsi que la manière dont marche le moteur que nous allons fabriquer. Ensuite, nous avons étudié les plans et la manière dont le moteur allait devoir être fabriqué. Cette étude nous a permis de voir de quels outils nous aurions besoin d'utiliser, voire de commander. Il en résulta un bon de commande disponible dans les annexes, qui référence les outils dont nous ne disposions pas, alors que nous en avons besoin pour la fabrication du moteur. De plus, nous avons pu déterminer la manière dont nous allons procéder pour le fabriquer.

La fabrication s'est déroulée en deux étapes.

Premièrement, nous avons marqué et pointé les pièces, en suivant rigoureusement les plans, afin de déterminer où nous devons percer. Ensuite, nous avons percé les pièces, toujours en faisant bien attention à respecter les dimensions des forets et la place des forages. Enfin, les trous qui le nécessitaient ont reçu un filetage grâce à des fileteurs et un tourne à gauche. La deuxième étape est le montage. Une fois toutes nos pièces usinées, nous avons monté le moteur.

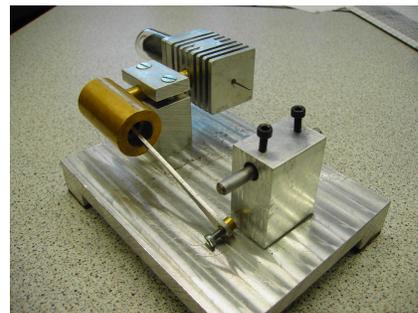


FIG. 3.8: Phase d'ajustements

Malheureusement, le résultat ne fut pas celui escompté. En effet, malgré le fait que nous ayons réussi à fabriquer les deux moteurs, les problèmes que nous avons rencontrés, ne nous ont pas permis d'aller plus loin. De plus, le fait que les moteurs ne soient pas fonctionnels est quelque peu démoralisant, mais le fait que nous ayons réussi à les finir reste satisfaisant. De plus, il ne reste qu'une toute petite marche vers un moteur fonctionnel, car il ne subsiste que quelques problèmes de frottement dont nous pourrions nous débarrasser en démontant le moteur et en ajustant mieux les pièces. Nous n'avons pas non plus réalisé les montages électriques sur les moteurs, faute de temps. Néanmoins, il est toujours possible de mettre en place ces montages.

### 3.5.2 Améliorations envisageables

De nombreuses améliorations seraient possibles sur le moteur, en voici une liste non exhaustive :

- Mettre en place les systèmes électriques déjà mentionnés ;
- Mettre en place un système autolubrifiant. En effet, le moteur à besoin d'être en permanence « réalimenté » en lubrifiant, sous peine de voir le voir s'arrêter ;
- Mettre en place une bague chauffante ;
- Mettre en place un système de refroidissement du moteur par petit filet d'eau au niveau de la zone froide. Le rendement serait considérablement amélioré.

Toutes ces améliorations seraient possibles à réaliser, mais encore une fois, le temps nous fait défaut. Néanmoins, la création, la réalisation et la mise en place de ces système pourrait être un excellent exercice pour de futurs groupes de P6-3.

## Conclusion sur le projet

Ce projet de réalisation d'un moteur Stirling nous a permis de nous replonger dans le domaine de la thermodynamique telle qu'on avait pu la découvrir au deuxième semestre. En plus de la théorie physique sur laquelle se base ce moteur, sa fabrication nous a ouvert à d'autres expériences bien réelles : le pointage, le perçage, le taraudage, etc., sont des activités qu'il ne nous avait jamais été possible de réaliser depuis notre arrivée à l'INSA. Cette concrétisation de nos cours de thermodynamique a suscité notre intérêt tout au long de ce semestre.

Enfin, ce projet de P6-3 a été une nouvelle opportunité pour travailler une fois de plus en équipe et nous a permis de nous confronter aux réalités du travail d'un ingénieur : prises de décisions, répartition des tâches, anticipation des problèmes et respect des délais sont autant de notions que nous nous devons de suivre.

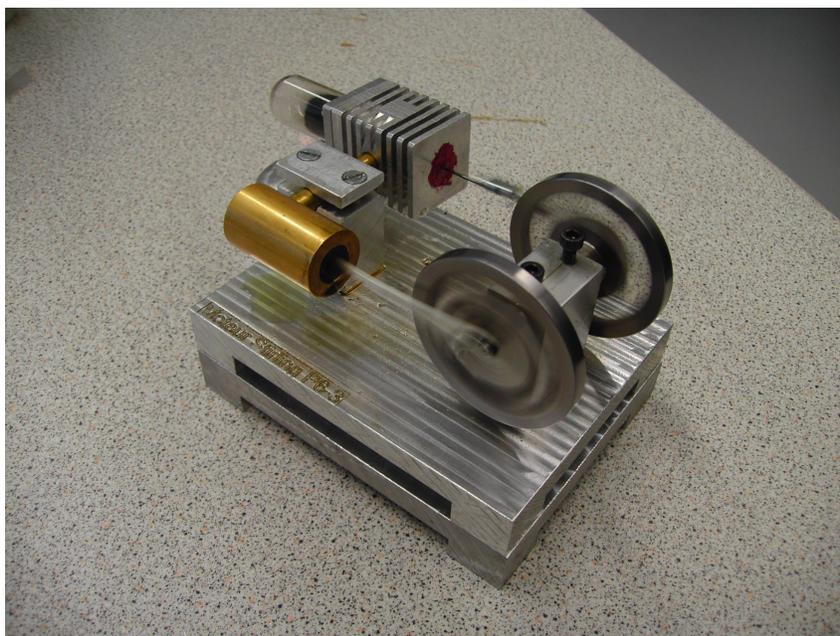


FIG. 3.9: Un Stirling à pleine vitesse

# Conclusions personnelles

## Julien Bernard

Dans la continuation des projets d'informatique et de mathématique, ce projet de fabrication d'un moteur Stirling de type gamma m'a énormément appris sur le travail au sein d'une équipe. En effet, dès le début du projet, nous avons dû mettre en place une répartition des rôles efficace pour assurer au groupe une optimisation du travail, puisque nous sommes nombreux à travailler sur ce projet. Chacun avait son rôle, pendant que les uns préparaient le bon de commande de matériel par exemple, les autres commençaient déjà la rédaction du rapport. Et lors de la fabrication du moteur, une répartition efficace des rôles à également dû être mise en place.

## Benjamin Brebion

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.

## Thomas Coursin

Pour conclure je dirais que l'expérience du projet de P6-3 a été enrichissante, en effet elle m'a permis de travailler en groupe et m'a également permis de concrétiser ce que l'on avait appris sur le moteur Stirling durant le cours de P1 de Mr Rello. Ce qui est important pour moi car cela m'a permis de mettre en pratique les notions de physique que je trouvais parfois trop abstraites. De plus, le fait de pouvoir choisir son sujet de projet est un point important car je n'ai pas eu l'impression de le subir contrairement aux anciens projets de physiques où nos sujets étaient imposés. En outre, ce dernier point est aussi très positif pour le groupe car il le rend plus dynamique et volontaire. Ainsi, j'ai pu travailler dans de bonnes conditions. J'aimerais ajouter que j'ai particulièrement apprécié ce projet car il regroupait beaucoup de manipulations et utilisations de machines ce qui est différent des autres cours. Puis, le fait de mener ce projet du début à la fin est très gratifiant car il permet d'apprécier le fait d'avoir créé notre propre moteur. Cependant je pense que nous étions trop nombreux à travailler sur le projet car il n'y avait pas assez de machines pour que tout le monde travaille en même temps. Mais, nous avons tout de même réussi à nous répartir le travail. Ainsi, on se réunissait au début de chaque séance pour définir la tâche que chacun devait effectuer. Enfin si on me demande ce que j'ai tiré comme leçon de ce projet, je répondrais qu'en travaillant en groupe on peut réaliser des choses difficiles à première vue mais s'il l'on s'investit et si le groupe est bien organisé on peut mener des projets bien plus importants que celui ci.

## Moussa Diakhité

Ce projet a été pour moi un pas de plus vers la vie professionnelle et un bon aperçu de ce qu'on peut attendre d'un ingénieur. En effet j'ai pu mesurer l'importance d'une bonne organisation avec notamment des personnes qui sans être des « chefs » ont été des points d'ancrage en quelques sortes pour chacun au niveau des tâches à effectuer, ils nous ont servi à mesurer l'avancement du projet et à le mener à son terme plutôt vite. La division des tâches a été cruciale, en effet la moitié du groupe s'est occupé de la rédaction de la partie théorique tandis que l'autre moitié a directement attaqué la réalisation des moteurs, une fois la rédaction théorique finie, le premier groupe a rejoint le second qui a donc pu s'occuper en parallèle de la rédaction de la partie expérimentale du dossier. C'est je pense l'organisation la plus efficace qu'on aurait pu mettre en place. Ça a donc été pour moi un plaisir et une expérience utile de participer à ce projet.

## Sylvain Legros

La réalisation d'un moteur stirling m'a permis de découvrir certains aspect d'usinage et d'outils que je connaissais pas avant, tel que le "tourne à gauche" servant à réaliser les pas de vis ou encore l'outil servant à faire les chanfreins pour les tête de vis coniques. D'un point de vue touchant plus mon opinion personnelle, ce projet m'a aussi fait prendre conscience du potentiel d'un tel moteur appliqué à l'industrie d'aujourd'hui, et me fait me poser de nombreuses questions sur sa non-considerations de son potentiel. Dans le secteur de l'automobile par exemple, on lui reproche souvent son manque de couple. Mais en couplant un moteur stirling à un moteur électrique ,qui est actuellement un des moteurs développant le plus de couple le problème ne serait-il pas résolu ? Le stirling rechargerait la batterie, diminuant ainsi la taille de cette dernière de par son approvisionnement constant. Cela résoudrait dans le même temps le problème du lithium constituant les batteries qui est aujourd'hui un frein à la production en masse.

## Pierre Malbois

Pour moi ce projet à été l'occasion de mettre en pratique certaines notions de cours comme la Cti-2. Cela m'a permis également d'apprendre comment le métal pouvait être usiné. Par exemple, je ne savais pas comment était réalisé un taraudage avant. En revanche, j'aurais préféré que ce projet soit un peu plus libre et devoir réaliser entièrement le moteur, sans avoir à utiliser un kit. Même si le résultat aurait été plus artisanal et moins propre, je pense qu'on aurait pus être plus imagitatif.

## Maxime Pattyn

Personnellement, j'ai trouvé ce projet très intéressant et enrichissant, tant dans la réalisation que dans la partie plus théorique. En effet, même si le moteur n'est pas fonctionnel au final, la fabrication reste une étape très intéressante, aussi bien sur le plan de l'apprentissage de la gestion d'un projet. De plus, voir comment on fabrique des moteurs est très intéressant. Autant la fabrication que de voir comment on peut fabriquer de pareils engins m'a appris de nombreuses choses, et m'a permis de mieux découvrir le monde de la mécanique, que je ne connaissais que très peu jusqu'alors.

## Elie Receveur

Ce semestre, j'ai choisi de suivre les enseignements préparant au département EP. Par conséquent, ce projet me semblait idéal puisqu'il touchait parfaitement au sujet et me permettrait de me faire une petite idée de ce que je pourrais retrouver dans l'hypothèse où j'intégrerai ce département. Le fonctionnement du moteur Stirling est chose que j'ai trouvée intéressante mais l'usinage des pièces et leur assemblage m'ont moins enthousiasmés que ce à quoi je m'attendais. Ce que je retiens comme le point le plus positif de ce projet, c'est surtout l'occasion d'avoir pu travailler en groupe, ce que j'apprécie toujours et qui me paraît très formateur.

## Simon Rohou

Ce projet de physique a été une excellente opportunité pour travailler à plusieurs sur un travail concrétisant nos cours de thermodynamique. La fabrication de ce moteur nous a enfin permis de pouvoir toucher aux machines pour créer par nous même et non rester dans une phase d'observation. Je regrette cependant de n'avoir pas pû aller plus loin dans ce travail : nous n'avons pas pu explorer les techniques de FAO ni utiliser de tour ou de fraiseuse. L'objectif de « découverte » n'a, je pense, pas été suffisamment mis en avant.

Enfin, ce projet nous a directement confronté aux réalités d'un ingénieur, à savoir : la prise de décisions, le respect des temps impartis, l'organisation de l'équipe, etc. Ces projets concrets sont à mon avis très formateurs dans le cursus STPI.

# Bibliographie

- [1] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_Stirling](http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling)  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [2] <http://leakystirling.free.fr>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [3] <http://www.moteurstirling.com>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [4] <http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=161>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [5] [http://esto.nasa.gov/conferences/nstc2007/papers/Shaltens\\_Richard\\_D2P1\\_NSTC-07-0138.pdf](http://esto.nasa.gov/conferences/nstc2007/papers/Shaltens_Richard_D2P1_NSTC-07-0138.pdf)  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [6] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT2002>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [7] <http://images.dailytech.com>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [8] <http://www.pile-au-methanol.com>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [9] <http://www.astralys-solutions.com>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [10] <http://esto.nasa.gov/conferences/nstc2007>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [11] <http://www.astralys-solutions.com>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [12] <http://www.youtube.com/watch?v=Gh7jJwUEvpc>  
(Valide à la date du 14.06.11)
- [13] <http://www.youtube.com/watch?v=FTSURNL5YUO>  
(Valide à la date du 14.06.11)

## Annexe A : Bon de commande d'outils

INSA de Rouen  
Avenue de la mare aux daims  
76800 St-Etienne-du-Rouvray  
02 35 78 68 41

Le 8 mars 2011,

**Objet :** Bon de commande

Madame, Monsieur,

Je vous prie de bien vouloir nous commander les outillages suivants :

- 1 foret de diamètre 0.8 de la marque OTMT	(ref 10 120 119)	pour un prix de 1.05 €
- 1 foret de diamètre 1.8 de la marque OTMT	(ref 10 120 191)	pour un prix de 0.71 €
- 1 foret de diamètre 2.5 de la marque OTMT	(ref 10 120 239)	pour un prix de 0.68 €
- 1 foret de diamètre 2.65 de la marque OTMT	(ref 10 120 248)	pour un prix de 1.24 €
- 1 foret de diamètre 3.0 de la marque OTMT	(ref 10 120 269)	pour un prix de 0.63 €
- 1 foret de diamètre 3.1 de la marque OTMT	(ref 10 120 275)	pour un prix de 0.91 €
- 1 foret de diamètre 3.3 de la marque OTMT	(ref 10 120 293)	pour un prix de 0.79 €
- 1 foret de diamètre 3.8 de la marque OTMT	(ref 10 120 329)	pour un prix de 1.05 €
- 1 foret de diamètre 4.1 de la marque OTMT	(ref 10 120 347)	pour un prix de 1.08 €
- 1 foret de diamètre 5.0 de la marque OTMT	(ref 10 120 413)	pour un prix de 0.88 €
- 1 foret de diamètre 7.0 de la marque OTMT	(ref 10 120 557)	pour un prix de 1.87 €
- 1 foret de diamètre 8.0 de la marque OTMT	(ref 10 120 623)	pour un prix de 2.09 €
- 1 foret de diamètre 11 de la marque OTMT	(ref 10 120 785)	pour un prix de 5.01 €
- 1 jeu de taraud de diamètre M3 de la marque OTMT	(ref 14 102 201)	pour un prix de 8.96 €
- 1 jeu de taraud de diamètre M4 de la marque OTMT	(ref 14 102 205)	pour un prix de 8.96 €
- 1 fraise à découper de la marque PLURA	(ref 22 025 028)	pour un prix de 38.29 €
- 1 tube de colle de la marque LOCTITE	(ref 83 100 454)	pour un prix de 21.28 €

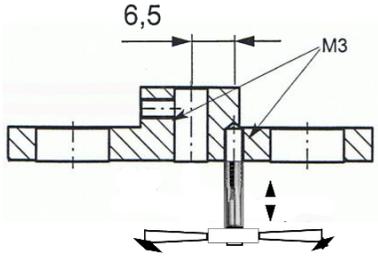
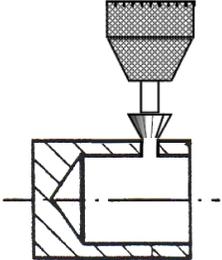
Soit un total de : 95.48 €

Je joins donc à ce bon de commande, un chèque de ce montant. Veuillez prendre note de notre présente commande et nous l'expédier dans les plus brefs délais.

Veuillez agréer, Madame, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.

INSA

## Annexe B : Exemple de gamme d'usinage

Opérations d'usinage	Machines, outils de contrôles	Croquis
<p><b>Pièces à usiner :</b> Roue motrice du piston            → Perçage à 2.5 mm            → Taraudage M3</p> <p><b>Positionnement :</b>            La pièce est maintenue dans un porte pièce fourni.</p> <p>Ébavurage de la surface si nécessaire.</p>	<p>Pointeau manuel.            Perceuse à colonne.            Taraud à main.</p> <p><b>Contrôles :</b>            Contrôle visuel de la pièce.            Vérifier le taraudage avec une vis de contrôle (perpendicularité &amp; bon filet)</p> <p>Lime</p>	
<p><b>Pièces à usiner :</b> Piston mécanique            → Pointage préalable            → Perçage à 1.8 mm            → Alésage à 2 mm</p> <p><b>Positionnement :</b>            Maintenu par un étau avec mâchoires plastiques.</p> <p>Ébavurage de la surface si nécessaire.</p>	<p>Pointeau            Perceuse à colonne            Foret 1.8 mm            Alésoir</p> <p><b>Contrôles :</b>            Contrôle visuel de l'état de surface.</p> <p>Lime</p>	

On peut calculer la vitesse de coupe en appliquant la formule suivante :

$$V_c \text{ m/min} = \frac{\pi D N}{1000}$$

pour  $N = \frac{V_c 1000}{\pi D}$

Avec :

pour de l'alu :  $V_c = 100 \text{ m/min}$   
 pour de l'acier :  $V_c = 60 \text{ m/min}$ .