

Conception et Réalisation d'un Moteur Stirling



Etudiants :

Antoine BEAUQUET

Mehdi BENSAID

Pierre Alain DUCHENE

Fany DUPLESSIS

Bastien JESSEL

Laure WELCKER

Enseignant-responsable du projet :

Daniel RELLO

Date de remise du rapport : **22/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 029**

Intitulé du projet : **Conception et réalisation d'un moteur Stirling**

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

L'objectif de ce projet de P6-3 est, comme indiqué par l'intitulé, la conception et la réalisation d'un moteur Stirling. C'est un projet de type expérimental, de par la réalisation pratique d'un moteur, ainsi que par les mesures effectuées sur le moteur une fois celui-ci fini. D'un point de vue de l'organisation, ce projet a pour but de nous initier au travail en groupe, et à la gestion de projet. En effet, le métier d'ingénieur requiert des aptitudes importantes en management et organisation de travail en équipe. De même, ce projet implique un suivi complet de la réalisation du moteur, c'est-à-dire des phases de recherches/conceptions jusqu'à la phase finale de mise en œuvre/expérimentation.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. Etude théorique du moteur Stirling	8
3.1.1. Historique et applications du moteur Stirling.....	8
3.1.2. Le principe de fonctionnement	9
3.1.3. Les différents types de moteurs	10
3.2. Réalisation du premier moteur : Moteur Nivea 1.2.....	11
3.2.1. La réalisation.....	11
3.2.2. Résultats et difficultés	12
3.2.3. Améliorations	12
3.3. Réalisation du deuxième moteur	13
3.3.1. Conception et réalisation.....	13
3.3.2. Problèmes rencontrés et résolutions/modifications.....	14
3.3.3. Fonctionnement	14
3.4. Mesure sur le moteur Stirling.....	15
3.4.1. Mesure de la vitesse de rotation.....	15
3.4.2. Mesure de la puissance du Moteur Stirling.....	17
4. Conclusions et perspectives.....	19
4.1. Conclusions sur le travail réalisé	19
4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet	19
4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet.....	20
5. Bibliographie	21
6. Annexes.....	22
6.1. Schémas de montages, plans de conception.....	22
6.2. Propositions de sujets de projets.....	23

1. INTRODUCTION

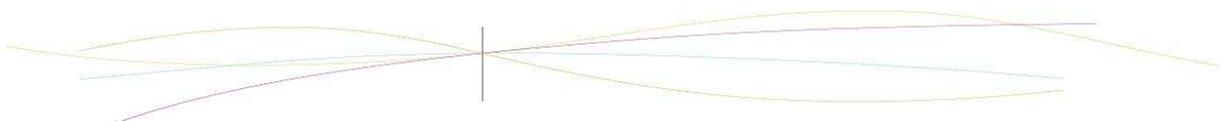
Lors de notre rentrée au quatrième semestre nous avons du faire un choix de projet dans le cadre de l'U.V. P6-3. Ces projets pouvaient être expérimentaux ou théoriques. Nous avons choisi un projet expérimental intitulé « conception et réalisation d'un moteur Stirling ». Cette U.V. était une nouvelle expérience pour chacun d'entre nous, puisqu'il s'agissait de travailler par groupe de 6 sur un sujet scientifique.

Afin de mener à bien ce projet, nous disposions d'un créneau le vendredi de 11h30 à 13h. Cependant, un travail supplémentaire en dehors de ce créneau était nécessaire pour la réalisation du moteur mais aussi pour l'écriture de ce rapport.

Lors de notre première rencontre, M. Rello nous expliqua tout ce que l'on devait savoir au sujet de cette U.V., son déroulement et nous donna quelques détails sur le moteur Stirling. Nous avons d'abord décidé d'effectuer des recherches sur le moteur Stirling de sorte de maîtriser le sujet avant de nous lancer dans un quelconque travail de réalisation. Une fois les recherches mises en commun, nous avons choisi de construire un moteur de type gamma. Il s'agit d'un moteur Nivea de type 1.2. Une répartition des tâches fut indispensable à l'avancée du projet.

Le but du projet était de concevoir et de réaliser un moteur Stirling, mais aussi de trouver un moyen de mesurer sa vitesse et sa puissance. Ce dernier objectif fut réalisé sur notre deuxième moteur, le premier ne tournant pas.

Nous avons rencontré quelques difficultés tout au long du projet, mais nous avons su les surmonter afin d'atteindre les objectifs fixés par le sujet. Dans une première partie nous vous présenterons l'organisation de notre groupe. Nous nous intéresserons ensuite au travail réalisé et aux résultats obtenus.

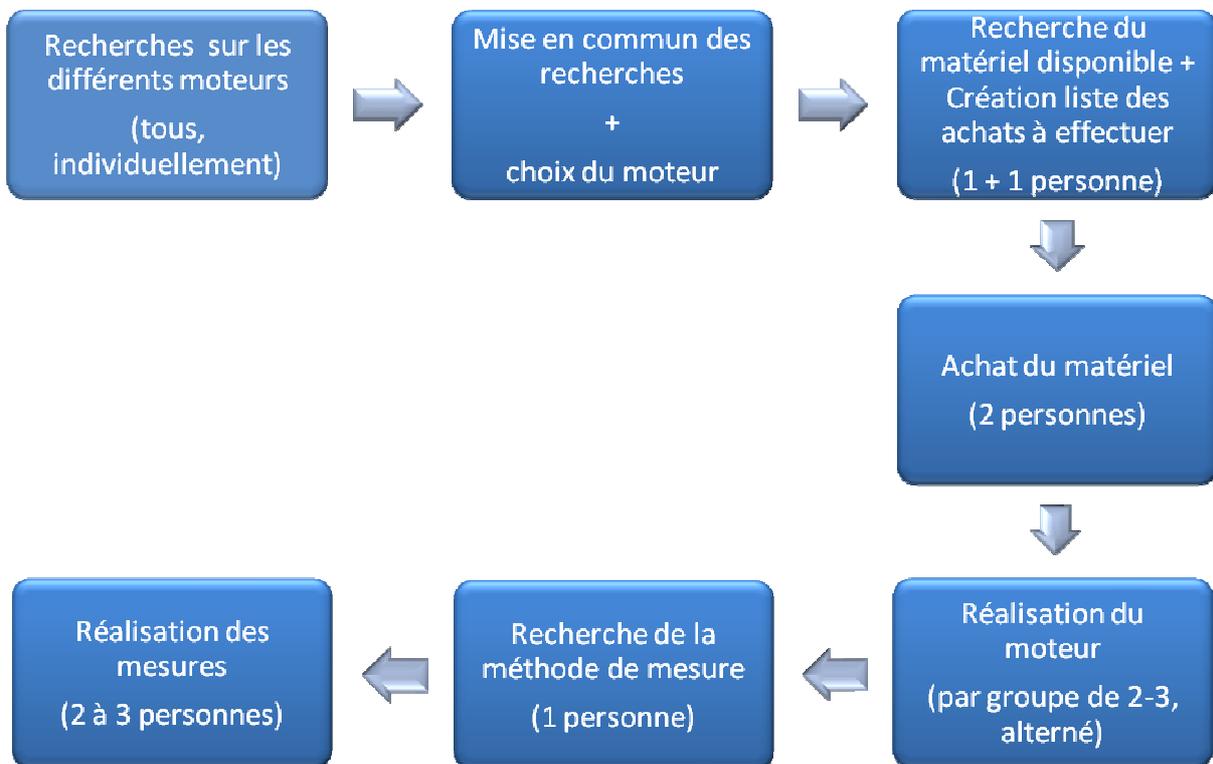


2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Comme dit précédemment, notre projet était avant tout expérimental. Cela nécessite donc une grande organisation et une bonne gestion de groupe pour être le plus efficace possible. Une bonne organisation de notre temps de travail passe obligatoirement par une répartition des tâches.

La réalisation de notre projet a nécessité plusieurs étapes, avec une organisation du travail différente pour chaque étape, chaque étape ne pouvant commencer sans que l'autre soit finie.

La première étape était une étape de recherche. En effet, même si nous avons déjà une idée de ce qu'est le moteur Stirling pour l'avoir vu en P1, il a fallu nous documenter un peu plus sur le sujet et chercher les différents types de moteurs qui existent. Après cela, nous avons également cherché des moteurs Stirling que l'on pouvait réaliser. Toutes ces recherches se sont faites individuellement.



L'étape suivante a donc été de mettre en commun nos recherches. Nous avons ainsi discuté des différents moteurs que l'on pouvait concevoir, pris en compte les préférences de chacun mais surtout le matériel qui était à notre disposition. Une fois le choix fait, nous avons demandé à M. Rello de valider le moteur que l'on avait choisi. Nous avons par la suite désigné un responsable de projet, en la personne de Pierre-Alain Duchene qui a centralisé toutes les informations et qui guidait le groupe. Puis, on a commencé à se répartir les premières tâches. Pendant que plusieurs personnes étaient préposées à commencer les recherches pour le dossier, d'autres devaient faire le récapitulatif du matériel que l'on avait déjà, une autre de celui qu'il faudrait acheter. De plus, pour une meilleure réussite, on a décidé de concevoir notre moteur en dehors de notre créneau de P6-3, car celui-ci ne nous

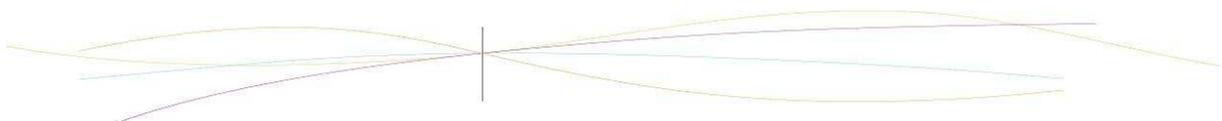


aurait pas permis de mener entièrement à bien notre projet. C'est pour cela qu'une personne était chargée de ramener du matériel de chez elle.

La prochaine étape consistait en l'achat du matériel dans un magasin de bricolage. Ces achats ont été minimes car on a vraiment essayé de réutiliser le plus de choses possible. Il s'agissait surtout d'acheter les colles, un tube en laiton de très petite section... 2 personnes étaient en charge de ces achats.

Une fois cela fait, il ne nous restait plus qu'à réaliser notre moteur. C'est bien sûr cette étape là qui nous a pris le plus de temps. La conception du moteur se faisait généralement le jeudi après-midi. Pour la toute première séance de montage, nous nous sommes tous les 6 réunis et chacun faisait quelque chose pour construire la base du moteur. Par la suite, pour plus de rapidité, on a décidé de se réunir par groupe de 2-3 personnes, pour avancer le moteur. Ces groupes changeaient chaque semaine, et même au cours d'une après-midi. Cela nous a permis d'être vraiment efficace, de tous toucher au moteur et de n'avoir personne sans occupation.

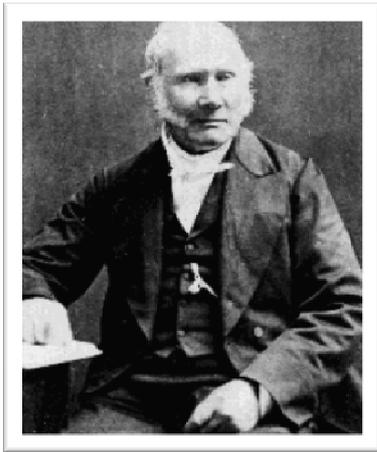
Une fois que notre moteur a fonctionné, une personne a été en charge de faire des recherches sur les façons de faire des mesures sur notre moteur. Une fois la méthode trouvée pour les différentes mesures, 2 à 3 personnes se sont chargées d'effectuer ces mesures. Par la suite, nous nous sommes répartis de même le travail pour constituer le dossier. Chacun a fait quelque chose et Pierre-Alain s'est chargé de tout rassembler.



3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Etude théorique du moteur Stirling

3.1.1. *Historique et applications du moteur Stirling*



Le moteur Stirling a été inventé au 19ème siècle par le pasteur Robert Stirling. Le 20 janvier 1817 ce pasteur dépose le brevet pour un moteur à air chaud. Ce moteur avait été à l'origine inventé pour remplacer les chaudières à vapeur qui explosaient suite à des problèmes d'entretien ou de conception. L'intérêt de ce moteur est qu'il ne nécessite pas de fortes pressions. Industrialisé en 1843 par le frère de Robert Stirling il fut utilisé dans diverses applications telles que le pompage d'eau et la production d'électricité. La machine à vapeur malheureusement s'imposa à cette époque. En 1938 le moteur connaît de nouveau un essor grâce à la société Philips qui crée un moteur, maintenant appelé moteur Stirling, de 200 chevaux avec un rendement supérieur à 30%.

C'est finalement à notre époque que le moteur Stirling connaît son heure de gloire. La politique actuelle sur la protection de l'environnement et la menace de la fin du pétrole redonne des avantages à ce moteur.

Ses utilisations principales sont dans les domaines de :

- ✚ Production d'électricité. Le moteur Stirling à un meilleur rendement que les panneaux solaires (15% contre 40%). D'où son utilisation par la NASA sur les satellites et sondes spatiales. Il faut noter aussi que les panneaux solaires ont tendance à s'abimer sous l'effet des poussières et mini météorites. Si les panneaux solaires sont majoritairement utilisés aujourd'hui c'est en raison de leur fiabilité. N'ayant pas de pièces mobiles ils tombent moins facilement en panne.
- ✚ Cogénération. La cogénération est un système permettant l'utilisation de la chaleur créée par la production d'électricité, généralement perdue, afin de répondre à un besoin thermique. La cogénération permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 80%. En 2009 Baxi met en vente une centrale de cogénération utilisant un moteur Stirling. La chaudière permet une production d'eau chaude et une production d'électricité.
- ✚ Réfrigération. L'armée utilise d'hors et déjà le moteur Stirling pour le refroidissement des systèmes de guidage militaire infrarouge. Il est également utilisé pour la liquéfaction des gaz. Il est aussi dans ce domaine utilisé pour refroidir à une température proche du zéro absolu les capteurs optiques présents sur les satellites.
- ✚ Propulsion. L'armée suédoise utilise le moteur Stirling afin de propulser des sous marins. Son avantage réside dans son fonctionnement silencieux mais aussi dans sa faible production de gaz imbrulés, qui doivent être comprimés à fortes pressions pour être évacués du sous marin.



- ✚ Quelques inventions se détachent du reste. Notons tout d'abord un sèche cheveux sans fil. La voiture Spirit d'American Motor Corporation en 1979 fut équipée d'un moteur "P-40" capable de brûler du gasoil ou de l'essence. Par rapport à un moteur standard Le P-40 fournit autant de puissance mais il permet de parcourir près de 30% de distance en plus et le tout en polluant moins.

Les dernières applications ouvrent de nouvelles portes à ce moteur. En 2008 le constructeur de carte mère d'ordinateur MSI a utilisé le moteur Stirling afin de refroidir ces cartes grâce à un ventilateur marchant grâce à la chaleur dégagée par la carte elle-même.



3.1.2. Le principe de fonctionnement

Ce moteur permet de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Au début du cycle, le gaz à l'intérieur du moteur est placé dans la partie chaude du moteur (différentes sources d'énergie possible: flamme, eau bouillante...) sa température et sa pression augmentent.

Ensuite, le gaz se dilate au sein du piston, permettant de transformer son énergie thermique en énergie mécanique. Un gaz à haute pression se dilatant permet de fournir beaucoup d'énergie mécanique. Cependant, le gaz ne peut pas se dilater infiniment : il faut le compresser dans le piston jusqu'à son état initial (afin de pouvoir renouveler la détente) en utilisant le moins d'énergie possible.

Pour arriver à ce résultat, on doit déplacer le gaz du côté chaud au côté froid du moteur, diminuant ainsi la pression. En utilisant l'énergie mécanique précédemment fournie, on comprime le gaz. En sachant que la compression d'un gaz à basse pression demande moins d'énergie que ce que la dilatation de ce gaz à haute pression fournit, on récolte un différentiel d'énergie mécanique à chaque répétition du cycle de dilatation à haute pression / compression à basse pression.

On nomme ce cycle thermodynamique le cycle de Stirling.

C'est un cycle fermé et réversible, ce qui signifie que si un travail mécanique est fourni, il peut fonctionner comme une pompe à chaleur.

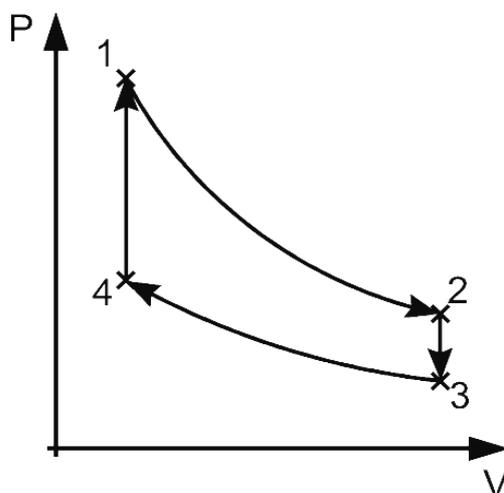


Figure 1 : diagramme de Clapeyron

Ce cycle comporte 4 phases:

- ✚ De 1 à 2, on observe une détente isotherme.
- ✚ De 2 à 3, on aperçoit le refroidissement isochore. Le gaz passe dans le régénérateur en lui transférant une partie de son énergie.
- ✚ De 3 à 4, il y a compression isotherme.
- ✚ De 4 à 1, on voit le chauffage isochore. Le gaz traverse le régénérateur et récupère de la chaleur.

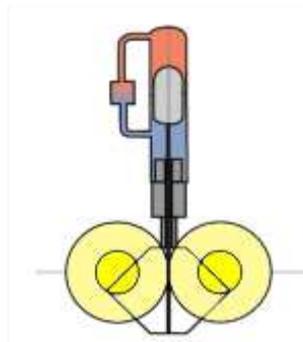
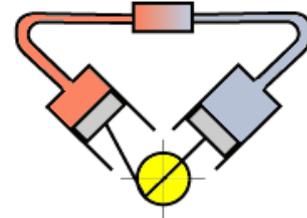


3.1.3. Les différents types de moteurs

Moteur type alpha

Le moteur alpha est constitué de deux différents pistons de puissance, l'un pour la source chaude, l'autre pour la source froide. Le gaz circule ainsi d'un cylindre à l'autre.

Ce type de moteur a un ratio puissance-volume très élevé, cependant les très hautes températures du piston chaud causent souvent des problèmes techniques, notamment au niveau des joints.



Moteur type bêta

Le moteur bêta possède également un volume de gaz délimité entre deux pistons : le piston moteur et le déplaceur.

Le fonctionnement du moteur bêta ressemble à celui du moteur gamma, sauf que les zones chaude et froide sont situées dans le même cylindre. Le principal avantage est la compacité du moteur, cependant le cylindre unique pour deux sources de chaleur pose le problème des pertes thermiques par conduction.

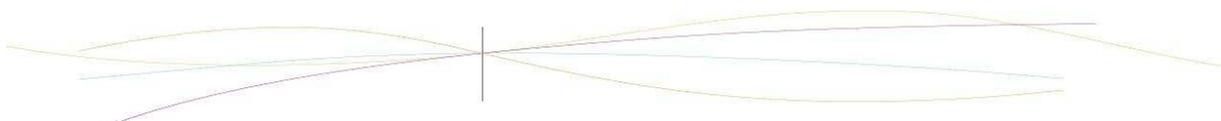
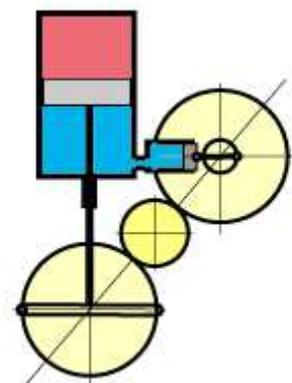
Moteur type gamma

Ce moteur est composé d'un piston de puissance (ou piston moteur) qui fait varier le volume global et récupère l'énergie, tandis que l'autre piston occupe le rôle de déplaceur.

Seul le piston moteur dispose d'un système d'étanchéité.

Le déplaceur occupe à tour de rôle la zone chaude et la zone froide, chassant le gaz vers la zone opposée. Les variations de température du gaz engendrent des variations de pression permettant le déplacement du piston moteur.

Ce type de moteur est utilisé pour mettre à profit de faibles écarts de température entre source froide et source chaude.



3.2. Réalisation du premier moteur : Moteur Nivea 1.2

Après avoir effectué des recherches sur internet pour savoir comment fabriquer un moteur Stirling nous avons choisi un moteur de type Nivea. Ce moteur est un moteur de type Gamma. Ce qui signifie qu'il est composé d'un piston moteur et d'un piston déplaceur qui sont dans deux compartiments différents.

3.2.1. La réalisation

La réalisation d'un moteur de type Nivea n'est pas très compliquée en soit. En effet, elle nécessite des matériaux simples à trouver, ce qui permet de réaliser un bon nombre de parties assez rapidement. Lors de la première réunion du groupe, nous avons ainsi pu monter le portique, que l'on a réalisé à l'aide de bâtonnets en bois. Pour le découpage de la bouteille de coca, M. Rello nous avait donné une méthode mais celle-ci demandait l'emploi d'outils que nous n'avions pas à notre disposition. Mais grâce à une feuille de papier et une paire de ciseaux, Antoine a réussi à nous découper des bouts de bouteille de coca



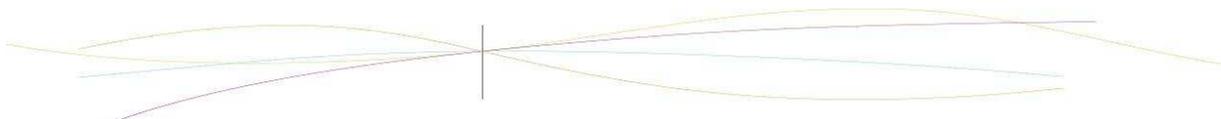
parfaitement ronds ! Le découpage du Scotch Brite, lui, n'a pas posé de problème, il a été fait à l'aide d'un cutter. Le volant d'inertie a été fait à partir d'un CD et de deux capuchons de boîtes de pellicule photo. Ceux-ci ayant déjà un centre de tracé, nous n'avons eu aucun problème pour trouver le centre et y faire passer la corde à piano. Nous avons aussi pu réaliser aisément le piston moteur fait à partir d'une boîte de pellicule photo, d'un gant en latex, d'un boulon et d'un écrou.

Comme nous ne trouvions pas de boîte Nivea à notre convenance, nous avons décidé de laisser l'un des membres du groupe ramener de chez lui, deux parties inférieures de boîtes de conserve. Nous étions munis d'une scie à métaux, nous avons donc pu découper sans difficultés les bouts en laiton qui constituent, avec la corde à piano, l'axe du moteur.



Une des difficultés, à laquelle on ne s'attendait pas, fut de redresser la corde à piano. En effet, nous l'avons eu chez un réparateur de piano, et il nous l'a donnée courbée. Nous avons donc dû la redresser du mieux que l'on pouvait. La deuxième étape la plus dure, fut de mettre les petites perles dans les tubes de laiton afin de limiter les mouvements amples du vilebrequin et d'éviter les fuites d'air. Pour que les perles collent instantanément, nous avons utilisé de la super glue, mais ce ne fut pas facile puisque les perles glissaient ou n'étaient pas tout à fait droites. Il ne nous restait plus qu'à donner à la corde à piano une forme en « zigzag ». Cette corde à piano était destinée à la bielle du déplaceur, sa forme en « zigzag » permet d'amortir les chocs du piston déplaceur lors de sa montée et de sa descente.

Tout ceci étant fait, il ne nous restait plus qu'à assembler toutes les parties préparées. Cette étape dura assez longtemps du fait que certaines collent mettent 16h à sécher (colle époxy). Nous n'avons eu aucun problème à assembler les grosses pièces, en revanche, les petites pièces nous ont demandé plus d'attention. En effet, il faut respecter au



maximum les alignements afin d'éviter tout frottement. Nous avons choisi de mettre une perle de part et d'autre du Scotch Brite afin que la bielle du déplaceur soit la plus droite possible.

Le moteur étant monté, nous avons ensuite effectué les réglages. Grâce aux visseries, nous avons pu régler la bielle du piston moteur. Il ne s'agissait plus que « d'équilibrer » le CD. Pour cela, nous avons utilisé de la pâte à modeler que nous avons placée à des endroits qui semblaient être appropriés.

Le moteur fut monté assez rapidement. Nous avons donc décidé de le faire tourner et au premier essai il a fait trois tours et s'est arrêté. Lors d'un deuxième essai, il ne fonctionnait plus. Beaucoup de frottements étaient apparus. Nous l'avons donc ramené le lendemain pour que M. Rello nous donne son avis.



3.2.2. Résultats et difficultés

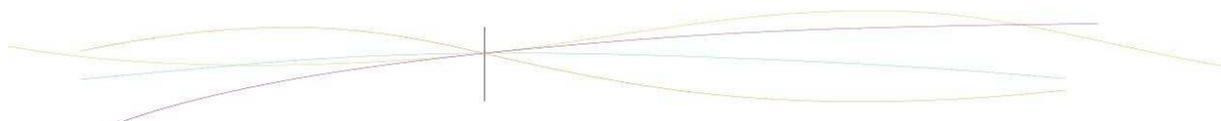
Comme dit précédemment, nous avons montré notre moteur à M. Rello. Celui-ci nous fit par tout de suite de son observation. Notre moteur ne tournait pas parce qu'il était mal équilibré. M. Rello nous a donc donné une méthode qui consiste à mettre un bout de pâte à modeler dans l'axe de la bielle du piston déplaceur mais à l'opposé de celle-ci et de rajouter, si nécessaire, un autre bout de pâte à modeler de telle sorte que les deux bouts fassent un angle de 90° entre eux. Ce que nous avons fait, et effectivement, après essais, le moteur ne tournait plus. En faisant de nouveaux réglages sur la bielle du piston moteur, nous avons réduit les frottements au maximum. Mais le moteur ne tournait toujours pas. Nous avons alors pensé à l'étanchéité. Pour la renforcer, nous avons rajouté du mastic autour du piston moteur. Nous avons aussi rajouté une perle au niveau de l'axe du moteur afin d'avoir un meilleur alignement que ce que nous avons déjà. Mais tous ces nouveaux réglages furent sans succès. Notre moteur ne tourne toujours pas.

Nous avons plusieurs explications à cela. La première est qu'il doit encore exister des frottements que l'on ignore et que, par conséquent, nous n'avons pas réussi à réduire au maximum. De plus, les perles que nous avons utilisées étaient de très petite taille et se cassaient donc souvent. Enfin, la dernière explication est que nous n'avons peut-être pas assez bien redressé la corde à piano. Etant donné que le redressement a été fait à la main, ce n'est pas comme si la corde était droite d'origine, et il se peut qu'elle soit toujours un petit peu courbée, ce qui empêcherait le bon fonctionnement des deux bielles.

3.2.3. Améliorations

Ne voulant pas rester face à un échec, nous avons donc décidé de faire quelques améliorations à notre moteur. Pour cela, nous avons pris des perles plus grosses, ce qui évitera qu'elles ne se cassent au moindre choc. De plus, nous avons réussi à récupérer une corde à piano parfaitement droite afin d'éliminer le problème de courbure de la précédente.

Ces deux changements ont permis de diminuer de façon significative les frottements, surtout au niveau du piston déplaceur. Malheureusement notre premier moteur ne tourne toujours pas. Les frottements ont été très largement réduits, ils sont pratiquement devenus inexistantes. De plus, les perles ne cassent plus. A vide, lorsque l'on n'applique aucune différence de gradient de température, le moteur tourne très bien. Toutefois, lorsqu'on applique une différence de gradient de température, il se lance, mais s'arrête presque aussitôt. Nous pensons que le problème provient du fait que le piston déplaceur (scotch Brite) frotte soit en haut, soit en bas des parois métalliques.



3.3. Réalisation du deuxième moteur

L'idée de la construction de ce deuxième moteur est apparue au fil de la construction du premier modèle, et ce surtout aux vues des problèmes rencontrés lors de sa construction. En effet, les problèmes « pratiques » auxquels nous avons été confrontés, et les quelques idées permettant de les contourner ont permis de modifier quelques éléments, et d'adapter d'autres solutions techniques pour la construction de ce deuxième moteur.

3.3.1. Conception et réalisation



Figure 1 :

Vue générale du moteur

Le but premier de ce moteur était d'être de construction simple, mais aussi d'être facilement réglable/démontable (en ce qui concerne les réglages du déphasage et de la course pour le piston déplaceur). Le type de moteur retenu bien évidemment gamma, tout comme notre premier moteur, et ce afin de bénéficier de l'expérience acquise durant la construction de ce dernier.

Les principales différences résident dans le choix des matériaux utilisés, mais aussi au niveau du dimensionnement des différents éléments. Le diamètre de la chambre du piston déplaceur est plus important (110mm) et la course de ce dernier est réduite à 9mm. De même, le diamètre « efficace » du cylindre

du piston moteur est au final de 18mm, après avoir été réduit à la suite de premiers tests de fonctionnement qui s'étaient soldés par des échecs. La course du piston moteur est quand à elle de 6mm.

Les parties haute et basse du cylindre du piston déplaceur sont réalisées en tôle galvanisée 10/10 (1mm d'épaisseur), et la portion de cylindre est réalisée dans une bouteille plastique. Pour ce qui est du piston déplaceur en lui-même, il a tout d'abord été réalisé entièrement en « Dépron » (plaque d'isolant thermique en polystyrène) d'épaisseur 3mm, de diamètre 100mm. Cependant, suite aux échecs des premiers essais, il a été ajouré et ces lumières ont été complétées par du « Scotch-Brite » (ayant la fonction de régénérateur). Le portique supportant l'axe du volant d'inertie est réalisé en bois balsa de section carré 10mm (tout comme sur le premier modèle).

Le point sur lequel ce moteur devait se différencier le plus de son prédécesseur résidait dans la solution technique utilisée pour les axes et liaisons. En effet, les soucis posés par l'utilisation et le collage de perles sur les axes ont été assez importants. Par conséquent, il avait été décidé d'utiliser des tiges carbonées, ainsi que des tubes (tiges de diamètre 4mm, avec des tubes de diamètre intérieur 4mm et 6mm extérieur). La corde à piano était ici seulement utilisée au niveau des liaisons entre bielles/ axes. Cependant, il est très vite apparu après le montage de ces éléments que les frottements étaient trop importants. En effet, les tiges de carbone étant composées de fibres, les frottements carbone/carbone sont extrêmement importants et sensibles aux poussières, même après lubrification. Cette solution n'était donc pas viable.

Après cet échec, la solution a été de repasser à la solution corde à piano/perles. Cependant, afin de ne pas tout recommencer à zéro, les portions de tube carbone au niveau du guidage du piston déplaceur, et de la liaison pivot du volant d'inertie ont été conservées. Ainsi, afin de réaliser le guidage de la corde à piano, les perles ont été collées sur des petits morceaux de plastique, ensuite percés, et le tout collé en bout des tubes carbone. Cette



méthode a permis d'éviter les nombreuses difficultés rencontrées durant la réalisation du moteur précédent, posées par le collage des perles directement en bout des tubes laitons.

Afin de pouvoir régler au mieux le centrage de la course du piston déplaceur, ainsi que le déphasage, la solution retenue est d'utiliser des « dominos » (dont la partie plastique a été retirée) pour relier et régler la longueur entre les différentes parties en corde à piano.

Ce moteur possède un petit trait d'originalité, de part le fait que le volant d'inertie est ici constitué de deux disques provenant d'un disque dur. Cette idée, ainsi que les pièces de disque dur, proviennent d'un enseignant de Terminal de l'un des membres du groupe. Ces disques sont en effet plus lourds qu'un simple cd, et remplissent donc plus efficacement le rôle de volant d'inertie.

3.3.2. *Problèmes rencontrés et résolutions/modifications*

En plus des problèmes décrits dans la partie précédente, d'autres problèmes ont été rencontrés lors de la réalisation de ce deuxième moteur.

Tout d'abord, le diamètre du piston moteur (membrane) a été revu à la baisse après les premiers tests, et ce afin que les déplacements verticaux de la membrane soient plus amples, et soient donc légèrement supérieurs à la course fixée. En effet, pour une même variation de volume du « gaz de travail » la réduction du diamètre entraîne une augmentation de la course, et vice versa.

Une autre modification apportée après les premiers tests a été d'augmenter la longueur de la bielle du piston déplaceur, ce qui a nécessité d'augmenter aussi la hauteur de l'axe du volant d'inertie et donc du portique. Cela permet de limiter l'angle pris par la bielle du piston déplaceur par rapport à la verticale. En effet, cet angle entraîne des efforts « en côté » au niveau de l'axe du piston déplaceur, ce qui augmente les frottements de ce dernier sur son guidage.

Enfin, il faut noter que le réglage de la tension de la membrane (piston moteur) est un point délicat à régler. En effet, lors des différents tests effectués, il est apparu que si cette dernière n'était pas assez tendue, elle gonflait « à côté » de l'axe et donc le moteur ne tournait pas. Au contraire, si elle est trop tendue, elle gêne le déplacement de l'axe.

3.3.3. *Fonctionnement*

Ce moteur fonctionne grâce à des glaçons et de l'eau chaude. A l'aide d'un thermomètre laser, il a été mesuré que la différence de température minimum entre les plaques chaude et froide devait être au minimum de 40°C pour que le moteur tourne. Actuellement et après quelques réglages, le moteur approche les 100tr/min juste après son démarrage, puis sa vitesse diminue progressivement jusqu'à la fonte totale des glaçons.



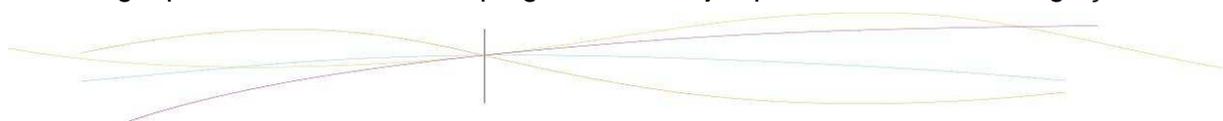
Figure 2 :

Sur cette vue, on distingue bien le tube carbone fermé par les 2 petites pièces plastiques traversées par l'axe en corde à piano. On remarque également les « dominos » servant aux réglages du moteur.



Figure 3 :

Vue sur la membrane, réalisée en gant latex d'une célèbre marque ...



3.4. Mesure sur le moteur Stirling

3.4.1. Mesure de la vitesse de rotation.

Dans la liste des objectifs de notre projet, figurent bien évidemment la conception et réalisation d'un moteur Stirling, mais aussi celle d'un système permettant la mesure de la vitesse de rotation de ce dernier, et ce afin de pouvoir en évaluer les performances.

Nous étant rapidement rendu compte que la réalisation d'un moteur Stirling nécessitait beaucoup de temps, nous avons donc recherché un moyen de mesure facilement réalisable mais aussi simple à mettre en œuvre.

La solution technique qui a été retenue est celle du capteur optique. En effet, l'un des membres du groupe a proposé cette solution, puisqu'il avait auparavant utilisé un système similaire pour un projet technologique lors de son année de Terminal (en option Sciences de l'Ingénieur).

3.4.1.1 Description du système

Ce petit montage électrique est en fait de conception extrêmement simple. Le fonctionnement du capteur optique (qui nous a été gracieusement offert par le lycée Juliot de La Morandière de Granville (50), que nous tenons à remercier), est en fait celui d'une barrière optique. Le capteur est constitué d'une diode émettant une lumière infrarouge (de longueur d'onde 950 nm), et d'un phototransistor positionné en face de cette dernière (voir schéma). Le capteur comporte donc 4 broches : 2 pour la diode (anode et cathode), et 2 pour le phototransistor (émetteur et collecteur).

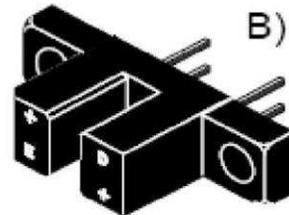


Figure 4:

Image 3D du capteur optique 1 (Tirée de la documentation technique)

Lorsque le phototransistor reçoit librement la lumière provenant de la diode (sans occultation), celui-ci est saturé (la lumière joue le rôle d'un courant qui circulerait de la base vers l'émetteur), et donc le courant peut circuler librement du collecteur vers l'émetteur. Au contraire, lorsque la lumière de la diode est occultée, la base du phototransistor n'étant plus « alimentée », et ce dernier est donc en état bloqué : il ne peut donc plus y avoir de circulation de courant du collecteur vers l'émetteur.

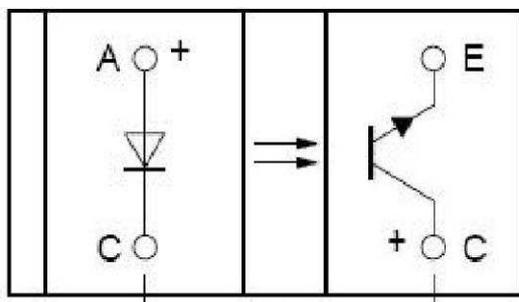
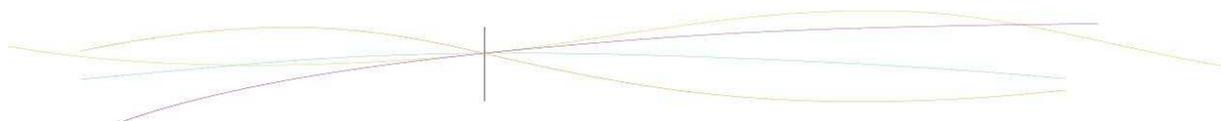


Figure 5:

Schéma électrique du capteur (Tirée de la documentation technique)

Le montage électrique à réaliser consiste donc à alimenter la diode et le phototransistor, et de permettre de récupérer la tension à la sortie du phototransistor. Pour cela, nous avons suivi le schéma de montage de test proposé sur la notice/mode d'emploi du capteur optique. Ce montage a été réalisé à l'aide de « dominos », qui permettent un montage/démontage facile du circuit. L'alimentation du circuit est assurée par une batterie 4,8V, ce qui rend le montage totalement autonome.

A noter que nous étudions le signal obtenu (de type carré) à l'aide des oscilloscopes de la salle de TP du D1.



3.4.1.2 Mise en place du système.

Afin de procéder aux différents tests de vitesse, nous avons décidé de tenir le capteur à la main, plutôt que de ne le fixer directement sur le moteur, ce qui aurait été contraignant du fait qu'il faut souvent faire des petits réglages sur le moteur, lui mettre les glaçons dessus, ... La partie qui sert à l'occultation (un petit morceau de papier) est fixée sur l'axe du piston déplaceur (nous avons tout d'abord songé à le mettre à la périphérie du disque, mais cela était rendu difficile par la présence des masses d'équilibrage, et nécessitait une plus grande précision).

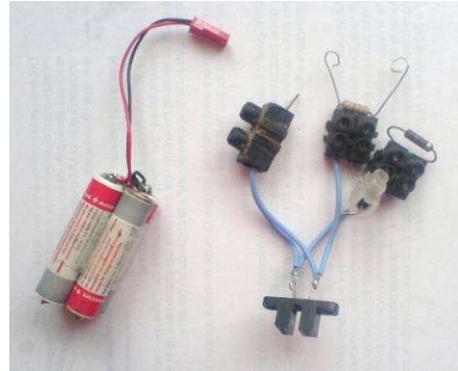
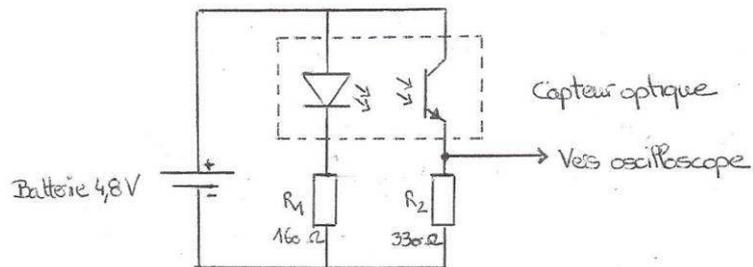


Figure 6 :

Vue du montage électrique et de la batterie

Figure 7:
Schéma électrique du montage complet.
Les 2 résistances utilisées ont pour valeurs :
R1 = 160 Ohms
R2 = 330 Ohms



3.4.1.3 exploitation des résultats.

Nous présentons ici un exemple de mesure réalisée sur le moteur, afin d'expliquer l'exploitation des résultats obtenus.

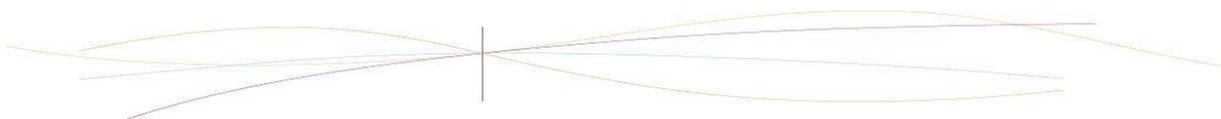
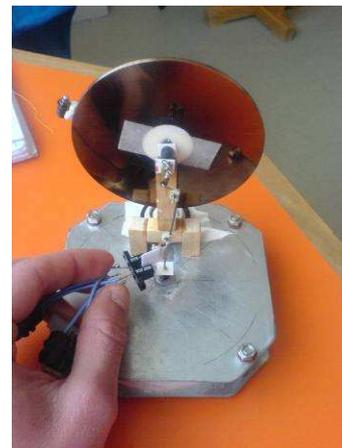
Sur la courbe du signal obtenu à l'aide d'un oscilloscope, on mesure la durée de 5 périodes (pour plus de précision), environ 2,9s.

eq 1. La période du signal vaut donc : $T = (2,9)/5 = 0,58s$.

eq 2. On retrouve la fréquence : $f = 1/T = 1,7Hz$.

La fréquence en Hertz représente le nombre de tour moteur par seconde. Or, afin de pouvoir exploiter ce résultat ultérieurement (pour le calcul de la puissance, ce résultat doit être exprimé en rad/s).

eq 3. Ainsi, on obtient notre vitesse angulaire : $w = 2*Pi*f = 10,7rad/s$ (environ 102 tr/min).



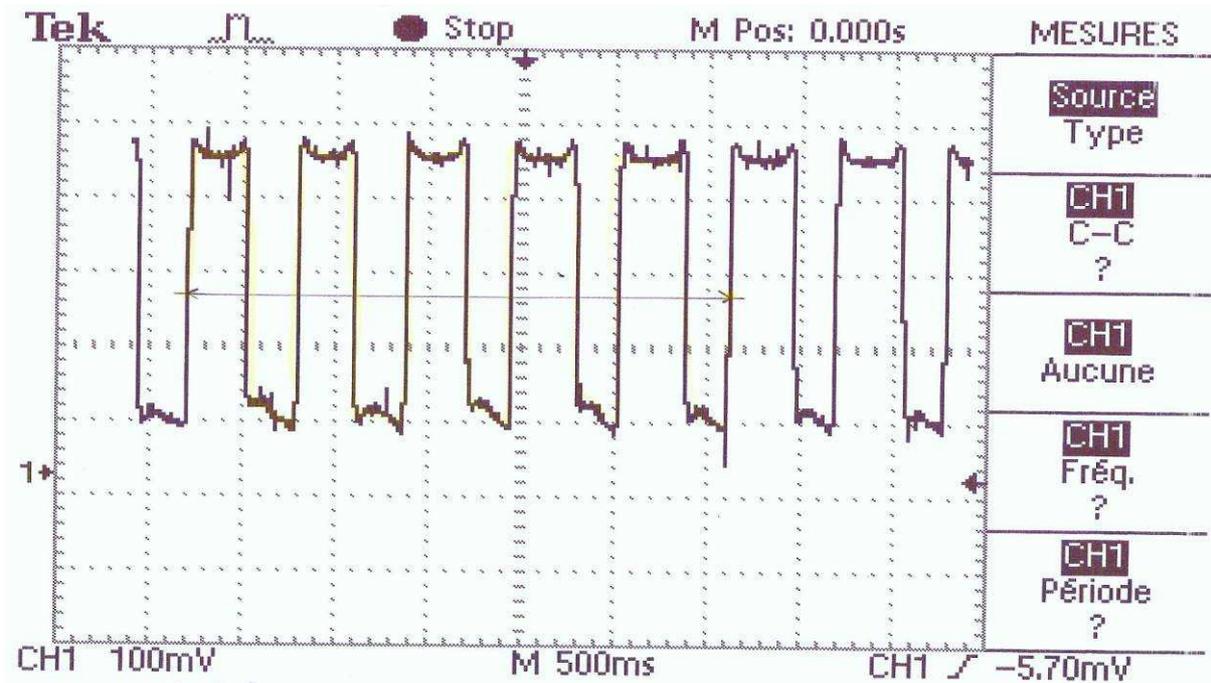


Figure 8 : Signal obtenu à l'oscilloscope, ici quelques secondes après démarrage.

3.4.2. Mesure de la puissance du Moteur Stirling

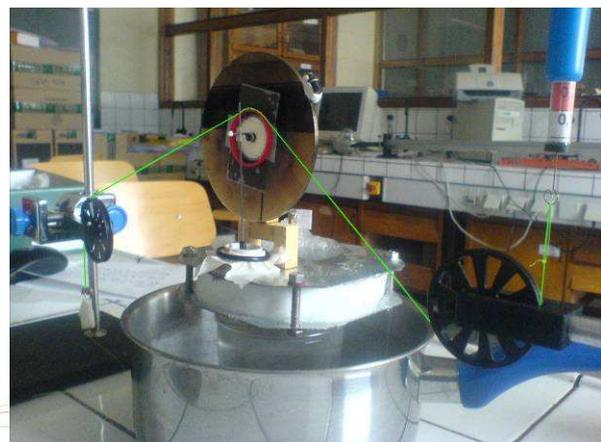
Afin de déterminer la puissance de notre moteur, nous devons rechercher une solution expérimentale permettant de déterminer le couple fourni par notre moteur. Ainsi, en couplant les mesures de couple avec celles que nous pouvons obtenir grâce à notre capteur de vitesse, nous avons pu calculer un ordre de grandeur de la puissance fournie par le moteur Stirling.

3.4.2.1 Description du système

Tout d'abord, il faut avoir à l'esprit que le couple d'un moteur est « une image » de la force que celui-ci peut fournir. En effet, le couple (ou moment) est par définition le produit d'une force (ou effort) par une distance (bras de levier). Le principe que nous avons utilisé pour mesurer ce couple est donc le suivant : nous faisons « forcer » notre moteur en lui appliquant des frottements par le biais d'un effort appliqué sur le volant d'inertie. Ainsi, tout en connaissant le rayon du disque sur lequel nous appliquons l'effort, et la valeur de l'effort appliqué, nous avons obtenu la valeur du couple fourni.

3.4.2.2 Mise en place

Nous avons mis en place cette expérience grâce au matériel fourni dans les salles de travaux pratiques du bâtiment D1 de l'I.N.S.A. Le montage utilisé est le suivant : un fil de nylon relie un dynamomètre avec une petite masse de 5g, pour que le fil soit tendu. Enfin, le moteur est placé entre le dynamomètre et la masse, ce qui implique que le fil est en contact avec le volant d'inertie du moteur.



Ainsi, en faisant varier la longueur de corde nylon en contact avec le volant d'inertie, les efforts de frottements appliqués sur ce dernier variaient, et nous pouvions mesurer cette variation d'effort sur le dynamomètre. Plus les frottements (donc l'effort appliqué) étaient importants, plus la vitesse de rotation du moteur diminuait.

Nous n'avons pu réaliser que 2 mesures différentes, car la puissance du moteur étant faible, il était difficile de trouver une position pour laquelle le moteur ne s'arrêtait pas sous l'effet des frottements. De plus, le dynamomètre dont nous disposions n'était pas assez précis (une graduation pour 0,01N) pour distinguer des variations d'effort qui sont au final assez minimes.

3.4.2.3 Exploitation des résultats

D'après des tests réalisés le 03 juin 09.

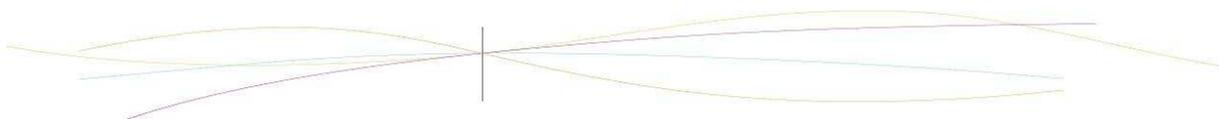
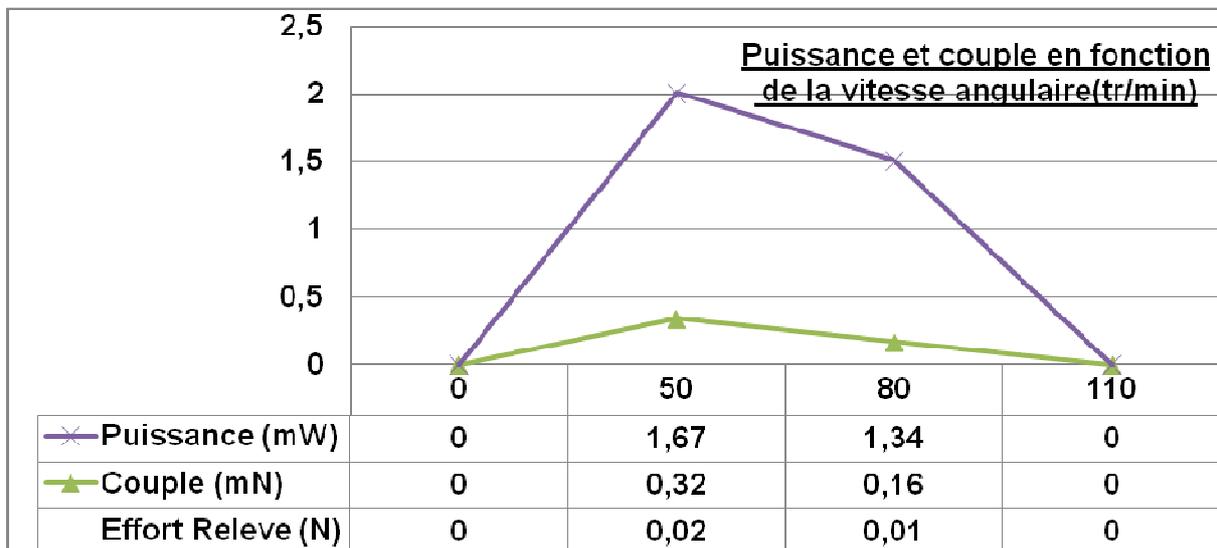
Formules générales:

eq 4. $Vitesse\ angulaire\ (rad/s) = Vitesse\ angulaire\ (tr/min) * \pi / 360$

eq 5. $Couple\ (N/m) = Rayon\ (m) * Effort\ (N)$

eq 6. $Puissance\ (W) = Couple\ (N/m) * Vitesse\ angulaire\ (rad/s)$

Relevé : (Rayon R = 0,016m)



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1. Conclusions sur le travail réalisé

Tout au long du semestre nous avons pu réaliser 2 moteurs et seulement un des deux fonctionne. Ce dernier nous a permis d'obtenir des mesures expérimentales afin de calculer la puissance, le couple et la vitesse du moteur. De ce fait les objectifs purement scientifiques imposés par le sujet ont été atteints. Ce projet nous a permis de comprendre la réalisation et le fonctionnement d'un moteur Stirling de façon concrète. De plus, nous avons pu appréhender l'intérêt du travail en équipe et de la répartition des tâches, afin de mener à bien le projet. Cette U.V. de P6-3 a permis de nous donner un aperçu du rôle de l'ingénieur.

4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet

Beauquet Antoine : Le bilan que je retire de ce projet est positif. En effet, nous avons réussi à atteindre l'objectif principal qui était la conception/réalisation d'un moteur Stirling, ainsi que d'effectuer des mesures de performance dessus. Mais au-delà de cet aspect « pratique », ce projet m'a permis de prendre part, au sein d'une équipe, à la réalisation complète d'un « produit », et ce de la phase de conception (recherches et investigations sur un sujet), à la phase finale de fabrication/tests, avec toutes les étapes de gestion de projet et d'organisation à mettre en œuvre.

Duchene Pierre Alain : Le projet de P6-3 m'a permis de créer quelque chose de concret. Le projet du moteur Stirling met en application le cours sur la thermodynamique. En outre il met en avant un travail de groupe à travers une gestion de projet. C'est par un travail collectif que le projet a pu être réalisé, car chacun a pu amener ses propres idées et solutions aux problèmes rencontrés que ce soit durant la phase de construction ou d'expérimentation.

Duplessis Fany : Ce projet a été très bénéfique pour moi. Tout d'abord, je n'aurais jamais réalisé de moi-même un moteur Stirling et ce type de moteur est vraiment très intéressant car il fonctionne un peu tout seul. Mais surtout, c'était très amusant de construire soi-même un moteur, avec du matériel uniquement de récupération et qui marche. De plus, tout le travail de groupe autour de la réalisation du moteur a été très enrichissant. En effet, pour être le plus efficace possible, il a fallu avoir une très bonne organisation et répartition des tâches, ce qui va beaucoup me servir pour l'avenir. J'ai vraiment apprécié travailler sur ce projet.

Welcker Laure : Lorsqu'il fallut faire un choix de projet pour l'U.V. de P6-3 j'ai tout de suite été intéressée par le sujet portant sur le moteur Stirling. En effet, ce projet permettait de répondre aux questions que je m'étais posées lorsque nous avons vu le moteur Stirling en cours. Je n'ai pas été déçue du choix que j'avais fait. Ce projet m'a permis de comprendre la différence entre la théorie et la pratique. Par exemple, notre premier moteur fut conçu en respectant les plans et les conseils de M. Rello et pourtant il ne tourne pas. De plus, j'ai pu réaliser ce que cela représente de mener un projet sur le long terme. Par ailleurs, l'organisation du groupe est un point non négligeable. Grâce à une bonne entente et des rôles définis dès le début, nous avons pu atteindre les objectifs dans les temps fixés. Je pense que cette U.V. est un aperçu du métier d'ingénieur et c'est pour cette raison qu'elle



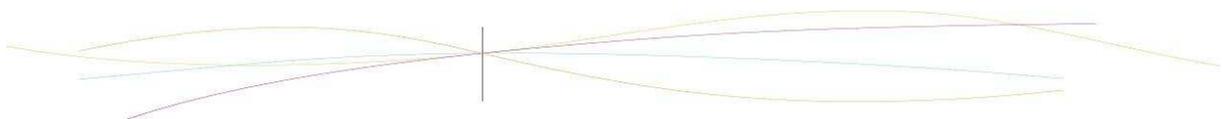
m'a plu. Enfin, ce fut une expérience intéressante tant sur le plan scientifique que sur le plan relationnel.

Jessel Bastien : Ce projet de physique m'a permis de découvrir comment travailler en groupe, par la répartition des tâches, la communication et la confiance en ses collègues. Cette expérience m'a entraîné à trouver et à prendre la place qui me convient au sein d'un groupe de travail. D'autre part, travailler à l'élaboration et la construction d'un moteur Stirling, précédemment étudié en cours, est enrichissant et permet de mieux comprendre la théorie.

Bensaid Mehdi : La réalisation du moteur Stirling m'a permis d'une part d'appliquer les connaissances théoriques que j'avais acquises en Thermodynamique en première année et de mieux comprendre son fonctionnement qui m'était ambigu auparavant. D'autre part, Ce projet m'a appris à savoir m'intégrer et travailler au sein d'un groupe, chose qui va m'aider plus tard dans le métier d'ingénieur.

4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet

Afin de poursuivre le projet, il serait intéressant d'installer le moteur Stirling sur une application concrète dans le but de récupérer l'énergie mécanique fournie, telle que la génération d'électricité. Pour cela il faudrait en priorité améliorer la puissance dégagée, par exemple en augmentant la taille du moteur ou en utilisant d'autres matériaux.



5. BIBLIOGRAPHIE

<http://www.photologie.fr/> (valide à la date du 13/06/09).

http://www.stirlingengine.com/faq/one?scope=public&faq_id=1 (valide à la date du 13/06/09).

<http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/513/TCST-2000.php> (valide à la date du 13/06/09).

<http://www.airsport-corp.com/stirlinginfo.html> (valide à la date du 13/06/09).

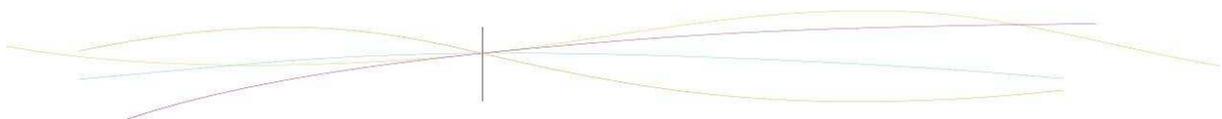
<http://www.moteurstirling.com/> (valide à la date du 13/06/09).

http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling (valide à la date du 13/06/09).

<http://www.moteur-stirling.com/stirling.htm> (valide à la date du 13/06/09).

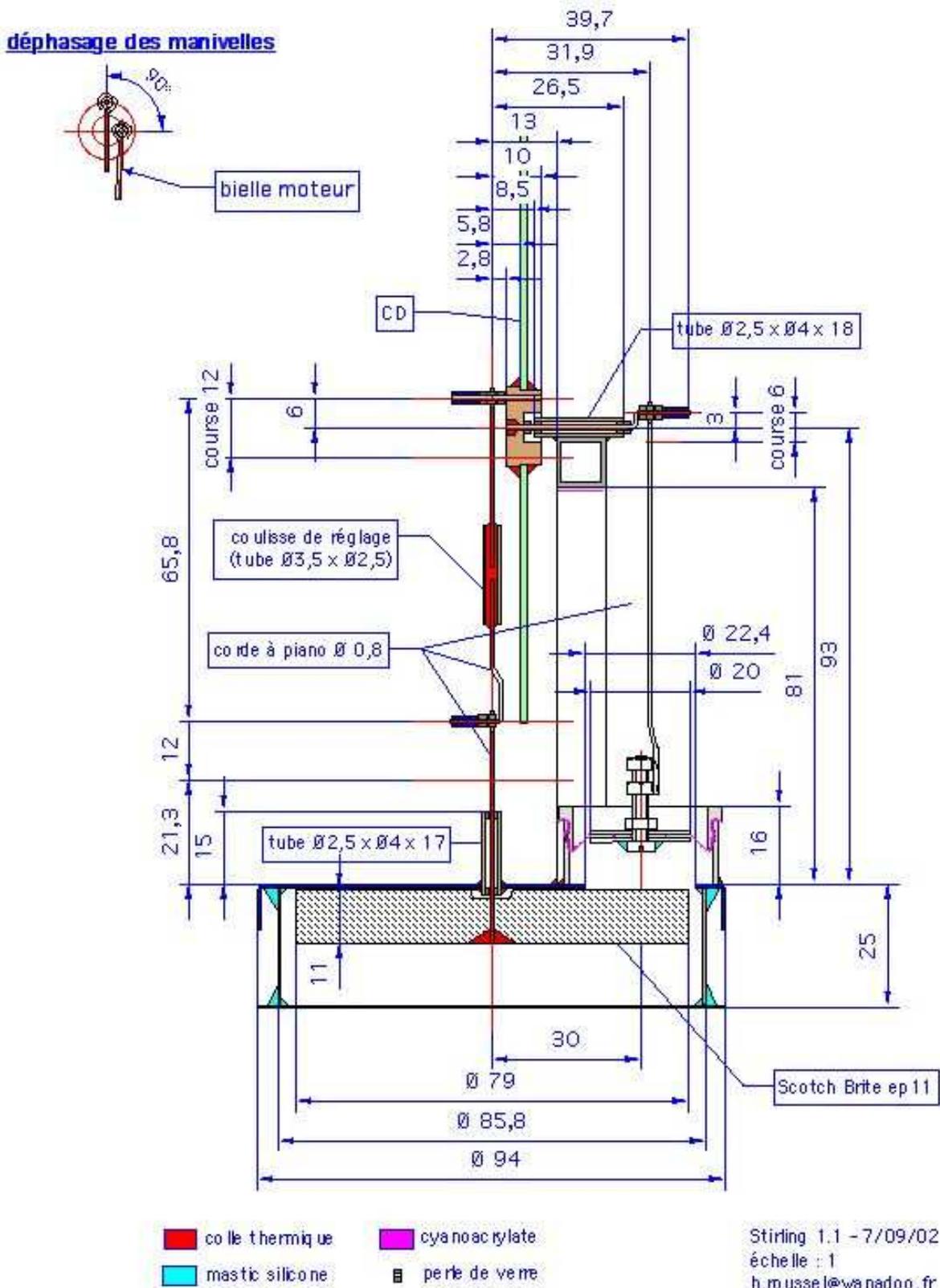
<http://www.discoverthis.com/article-stirling-engine-top10.html> (valide à la date du 13/06/09).

<http://www.auto-magique.com/Systemes-alternatifs.htm> (valide à la date du 13/06/09).



6. ANNEXES

6.1. Schémas de montages, plans de conception...



6.2. Propositions de sujets de projets

Projet en relation avec la recherche et l'utilisation d'énergies nouvelles/renouvelables (type éolienne, photovoltaïque, ...).

Projet sur la transformation ou le stockage de différents types d'énergie (mécanique, électrique, ...).

