



INSTITUT
NATIONAL
des SCIENCES
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2008 – 019



Nom des étudiants

Ruinet Valérie

Tayeb Mhamedi

El Angoudi Abdessamad Marouane Bouslam

Magda Benhaddi

Enseignant responsable du projet

M. Rello



Conception et réalisation d'un moteur Stirling



À TAILLE
HUMAINE
À L'ECHELLE
DU MONDE

Date de remise du rapport : 20/06/08

Référence du projet : STPI/P6-3/2008 – 019

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

Type de projet : (*expérimental, simulation, veille technologique*)

C'est un projet à la fois de recherche, de conception et de réalisation.

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

C'est un projet de réalisation. Dans notre cas, il s'agit d'un moteur. L'objectif est de créer un moteur Stirling qui fonctionne afin de calculer la vitesse de rotation, la pression, la puissance, et les températures effectives à la source froide et à la source chaude.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats	9
3.1. Histoire du moteur stirling, évolution.....	9
3.2. Les différents moteurs stirling.....	10
3.2.1. Moteur alpha.....	10
3.2.2. Moteur bêta.....	12
3.2.3. Moteur gamma.....	12
3.3. Etude thermodynamique.....	12
3.3.1. La propagation de la chaleur dans l'air.....	12
a. Les principes expérimentaux.....	12
b. Les équations.....	13
c. Et le Stirling dans tout cela.....	15
3.3.2. Les principes de base de la thermodynamique	16
3.3.3. La cinématique en quelques équations.....	17
4. Conclusions et perspectives.....	18
5. Bibliographie.....	19
6. Propositions de sujets de projets	20

1. INTRODUCTION

Nous avons travaillé dans le cadre de l'UV de P6-3 par groupe de 5, sur le thème proposé par M. Rello : le moteur stirling. Ce projet est une initiation à la conduite de projets en groupe. Le but du travail demandé est la conception et la réalisation d'un moteur stirling.

Le moteur ainsi réalisé servirait de base pour calculer la vitesse de rotation, la pression, la puissance, et les températures effectives à la source froide et à la source chaude. Malheureusement notre moteur ne fonctionne toujours pas à l'écriture de ce rapport.

Pour ce faire nous disposions du créneau horaire du lundi de 14h45 à 16h15. Un travail personnel supplémentaire a été nécessaire pour la bibliographie, la rédaction du rapport et la préparation de la soutenance.

Au commencement de notre projet nous avons le choix entre différents types de moteurs Stirling : le moteur alpha, bêta ou gamma. Après avoir étudié plusieurs plans trouvés sur internet, nous avons choisi le type bêta car il nous semblait le plus simple à réaliser.

Dans une première partie, nous verrons l'histoire du moteur Stirling au fil des siècles et son évolution.

Nous nous intéresserons en second lieu aux différents moteurs Stirling et leurs caractéristiques.

Enfin nous étudierons le fonctionnement du moteur Stirling en détails c'est-à-dire les 4 phases élémentaires, le rôle du déplaceur, le diagramme pression-volume et le rendement du cycle.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Description de l'organisation adoptée pour le déroulement du travail

Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés

Le projet de P6-3 concernant le moteur Stirling a fait intervenir, durant le semestre 4, les élèves ingénieurs : BEN HADDI Magda, BOUSSLAM Marouane, EL ANGOUDI Abdessamad, MHAMEDI Tayeb et RUINET Valérie.

Au début du semestre, lors de l'attribution des différents sujets nous n'étions pas très « emballés » par notre sujet puisque chacun d'entre nous aurait voulu travailler sur un autre sujet.

Cependant, après l'écoute des instructions concernant notre projet et des informations dont Monsieur RELLO, notre responsable de projet, nous avait faites part, nous avons répartis les différents rôles et essayer d'établir un planning de travail. Nos premières recherches ont commencé à susciter notre curiosité. En effet, on a découvert que le moteur Stirling était un moteur très intéressant, du point de vue de son fonctionnement et qu'il se décliné en différents modèles. On a donc décidé d'étudier les différents modèles afin de nous faire une idée du moteur que l'on allait fabriquer. De plus, nous sommes allés visiter les laboratoires de l'IUT de Rouen afin de voir les moteurs Stirling dont ils disposés. Les professeurs présents sur place ont été très aimables puisqu'ils nous ont très bien accueillis et nous ont fait part de leur savoir-faire en répondant à toutes nos questions et en nous donnant des informations supplémentaires qui nous ont beaucoup intéressées.

Il nous a fallu trois semaines avant de nous mettre d'accord sur le moteur que l'équipe allait concevoir. En effet, pour choisir le moteur adéquate il fallait faire l'inventaire du matériel nécessaire pour la conception, en fonction des moyens qui nous étaient accordés et du matériel possible que l'on pouvait trouvé en magasin. On a donc commencé par acheter (à Brico Dépôt) le matériel nécessaire pour réaliser notre projet (vis, écrou, colle, planche en bois...).

Pendant les semaines suivantes nous nous sommes hâtés à la tâche afin de réaliser notre premier moteur. Nous avons utilisé différentes boites de conserve afin de réaliser le corps du moteur, corps reposant sur une planche en bois que l'on a pris soin de scier. Dans ce corps, on a réalisé les différentes découpes permettant d'insérer les sources (chaude et froide) ainsi que les autres parties internes au corps qui allaient permettre le bon fonctionnement du moteur. Cependant nous avons été confrontés à un problème majeur lorsque la réalisation du moteur

fut achevée : il ne fonctionnait pas. Que s'est-il passé ? Nous avons négligé un détail. En effet nous avons utilisé une tige filetée pour permettre le déplacement du piston. Mauvaise idée, cela favorisé les frottements, frottements qui vont à l'encontre du bon fonctionnement du moteur. En effet, pour fonctionner correctement, il faut un minimum de frottement. Ainsi, nous avons remplacé cette tige filetée par une autre (non filetée).

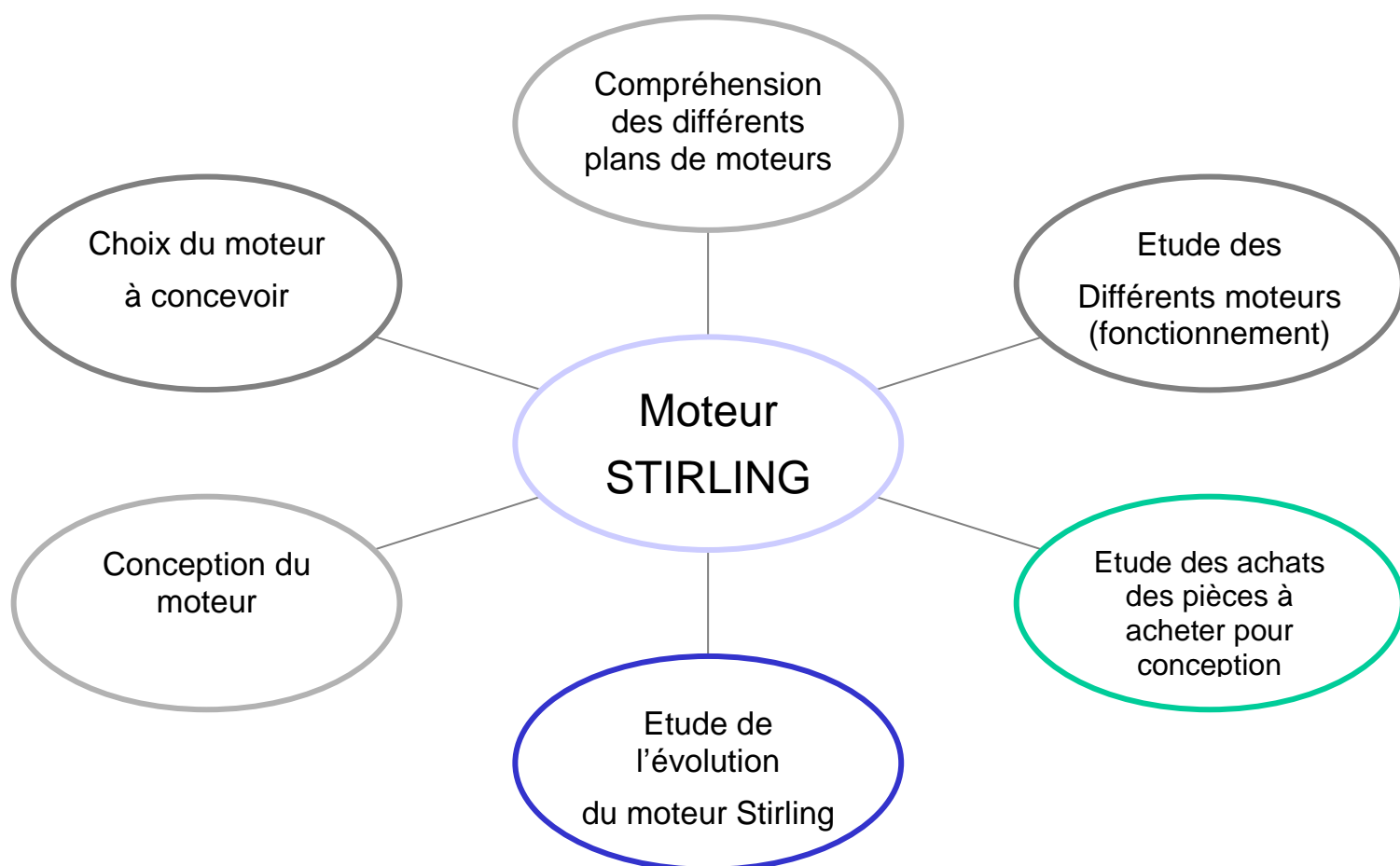
Au début nous étions assez réticents à l'idée de travailler sur ce projet mais notre avis a changé. Nous avons appris beaucoup de choses concernant le moteur stirling.

Organisation au sein d'un groupe est primordial pour travailler dans les meilleurs conditions. Ainsi afin d'organiser au mieux notre travail, à chaque début de séance nous faisons le résumé du travail et des problèmes de la semaine précédente et nous nous accordions sur ce que chacun devait faire pour la nouvelle séance. Par ailleurs, à chaque fin de séance nous faisons le point sur ce qui a été établi pendant l'heure et demie dans le but de ne pas se faire « dépasser par le temps » et de pouvoir finir dans les meilleurs délais notre projet.

Le travail en groupe a été très bénéfique et très intéressant, puisqu'il a permis à chacun d'entre nous à apprendre à être à l'écoute des autres, à défendre ses propres opinions quand nous n'étions pas en accord, à travailler dans une ambiance conviviale et à mettre en commun nos différentes connaissances.

Nous trouvons que l'initiative de mettre pour la première année une UV « projet P6-3 » constitue une idée ingénieuse qui nous a permis de nous donner un aperçu de ce que sera le travail en groupe lorsque nous serons ingénieurs : ce que nous retiendrons de cette expérience est que COMMUNIQUER et ETRE à L'ECOUTE DE SES CAMARADES est le plus important lorsque l'on travaille en groupe.

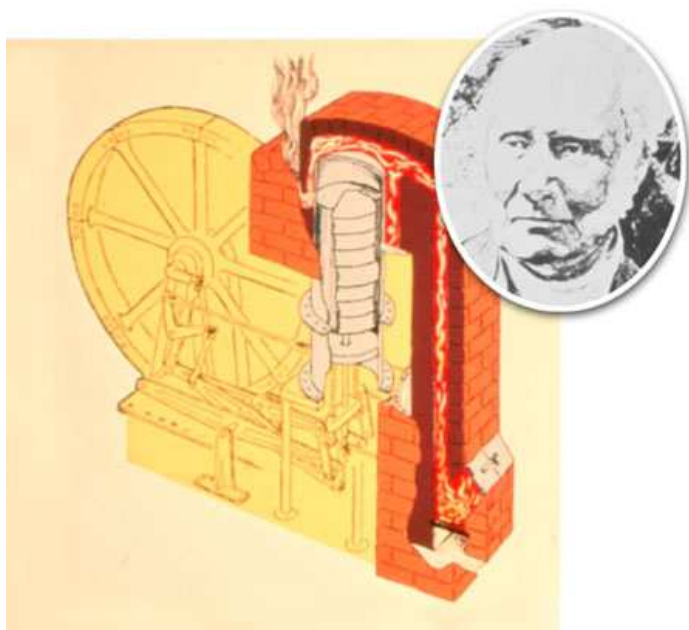
Organigramme des différents axes de travail :



3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Histoire du moteur Stirling, évolution

Le moteur Stirling aussi connu sous les noms de moteur à air chaud ou moteur à combustion externe, doit son nom à son inventeur Robert Stirling pasteur, mécanicien et métallurgiste anglais.



Stirling inventa le moteur en 1816 et déposa son brevet la même année qui ne fut officialisé qu'en 1817. Robert Stirling imagina son moteur à air chaud dans le but de diminuer les accidents liés aux chaudières à vapeur qui ne bénéficiées pas de matériaux de qualité à cette époque. Ces accidents étaient dus aux hautes pressions exercées au sein de ces machines à vapeur qui causaient souvent leur explosion.

Le principe ainsi que l'originalité de ce moteur réside dans le fait que la combustion est externe contrairement au moteur thermique. Ainsi, le fluide qui est un gaz est soumis à 4 phases au cours d'un cycle : chauffage

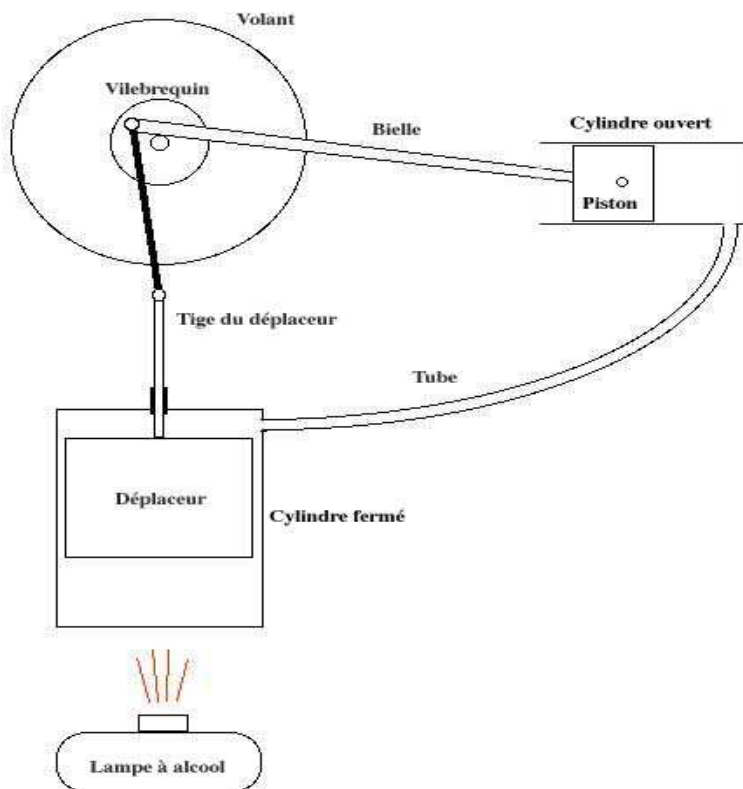
isochore, détente isotherme, refroidissement isochore puis compression isotherme. Pour améliorer son invention, Robert Stirling la muni d'un régénérateur de chaleur permettant d'augmenter le rendement du système qu'il appela « heat economiser » (économiseur de chaleur).

En 1843, son frère James industrialisa ce moteur pour une utilisation dans l'usine où il était ingénieur. Cette invention eut d'autres applications dans le monde agricole et dans l'industrie pour pomper de l'eau ou entraîner des générateurs de courant électrique mais fut limité par la compétition avec les machines thermique pourtant plus dangereuses qui prirent les devants à cette époque. Ce n'est qu'en fin du dix neuvième siècle que le moteur Stirling commença à s'imposer. C'est en 1938 que la société Philips reprend des recherches sur le moteur à air chaud, en investissant dans un "moteur Stirling", un moteur de plus de 200 chevaux, avec un rendement supérieur à 30%. Actuellement, ce type de cycle mécanique est utilisé dans de nombreux domaines comme le domaine spatial ou celui des applications solaires.

3.2. Les différents moteurs Stirling

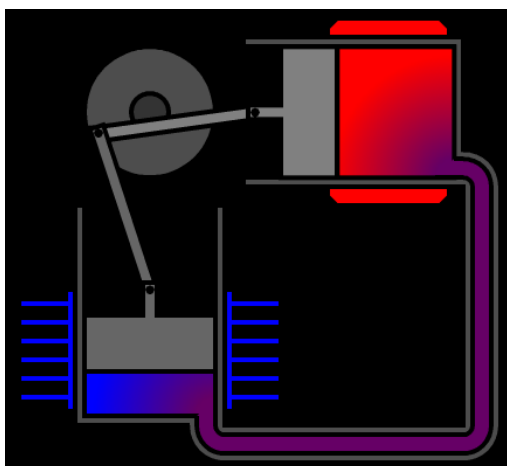
3.2.1. Moteur alpha :

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 à la plus haute température, et le piston froid, est situé près du point d'échange de température la plus basse. 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.



Les quatre phases élémentaires :

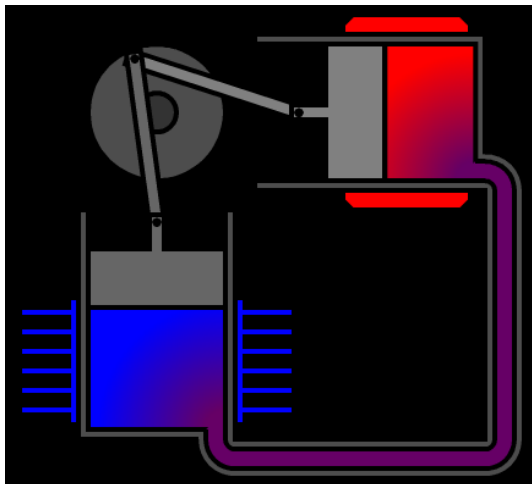
Le chauffage :



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

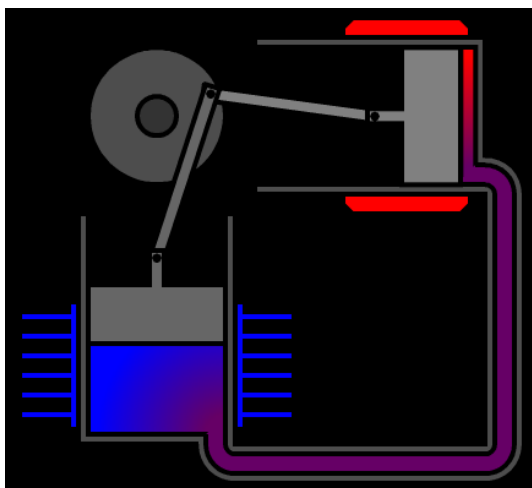
grâce à la bielle le piston froid vers le bas, ce qui concentre le gaz dans la partie chaude.

Détente :



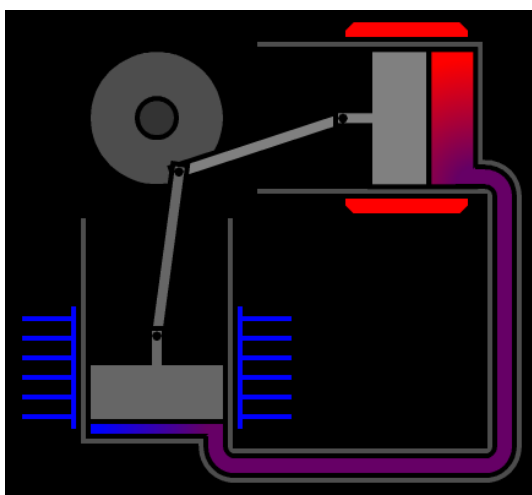
Le gaz est maintenant à son volume maximal. L'expansion du gaz ne peut plus se faire vers la droite (piston chaud en bout de course), et se fait maintenant (à droite) vers le cylindre froid (en bleu). Le piston chaud (rouge) envoie la plus grande partie du gaz vers le piston froid. Le piston bleu remonte,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

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

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.

3.2.2/ Moteur beta :

Ce genre de moteur 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.

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 chaude et froide 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.

3.2.3/ Moteur gamma :

Un Stirling gamma est un moteur Stirling doté d'un piston de puissance et d'un piston jouant à lui seul le rôle de déplaceur.

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

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

Le volume balayé par le déplaceur ne pouvant nécessairement pas être balayé par le piston de puissance, il constitue un volume mort. Pour cette raison, le moteur Gamma ne peut pas atteindre des rapports de compression élevés, ce qui limite les possibilités de rendement. En revanche, sa simplicité mécanique en fait un système largement utilisé, également sur les moteurs à plusieurs cylindres.

3.3 . Etude thermodynamique :

3.3.1. La propagation de la chaleur dans l'air.

a. Les principes expérimentaux.

L'équation qui décrit la propagation de la chaleur dans une substance se déduit de trois constatations expérimentales :

La première constatation est qu'en tout point d'une substance, la chaleur s'écoule du chaud vers le froid. La quantité de chaleur s'écoulant par seconde est proportionnelle à deux choses : la conductivité thermique de la substance et la pente avec laquelle la température décroît à l'endroit de l'écoulement.

La deuxième constatation expérimentale est que la température d'un volume contenant une substance augmente lorsqu'une quantité de chaleur y pénètre. Cette augmentation de température est bien sûr proportionnelle à la quantité de chaleur reçue et inversement proportionnelle au volume, à la densité de la substance qui s'y trouve et à sa chaleur spécifique.

La troisième constatation expérimentale est qu'aucune énergie ne se crée à partir de rien. Il en résulte un principe de continuité: la chaleur qui pénètre dans un élément de volume (selon la première constatation) doit nécessairement correspondre à celle qui en fait augmenter la température (selon la deuxième constatation). Autrement dit, en l'absence d'une source de chaleur dans le volume même, les deux chaleurs susdites doivent être égales sinon il y aurait création de chaleur spontanée, ce qui n'est pas possible.

b. Les équations.

Pour exprimer mathématiquement ces réalités physiques, nous nous contenterons d'une seule dimension de l'espace. Cela suffit à décrire ce qui se passe dans un fil ou dans un tube long et fin rempli de gaz. On indiquera par $T(x,t)$ que la température T est une fonction de la position x dans le tube et du temps t de l'observation.

Nous ferons encore l'hypothèse simplificatrice que la conductivité thermique et la chaleur spécifique des matériaux sont des constantes. Ce n'est pas le cas mais ce n'est pas très important pour nous : ce qui nous intéresse c'est de comprendre les mécanismes physiques en présence.

On peut exprimer la première constatation ci-dessus comme suit :

$$\delta Q = -k.S.(\delta T(x,t)/\delta x).\delta t \quad (1)$$

En d'autres termes la quantité de chaleur δQ s'écoulant pendant un court laps de temps δt à travers une surface S , est proportionnelle à la chute de température δT constatée à l'endroit x au moment t , sur une courte distance δx prise dans le sens de l'écoulement. Le rapport $\delta T(x,t)/\delta x$ n'est autre que la dérivée partielle première de T par rapport à x , c.-à-d. sa pente. Le coefficient de proportionnalité k est la conductivité thermique de la et le signe moins indique que l'écoulement se fait dans le sens de la chute de température.

Si on considère un petit volume de tube ou de fil, de section S et d'épaisseur Δx , la quantité nette de chaleur qui y pénètre est égale à celle qui y entre à l'endroit x , moins celle qui en sort à $(x + \Delta x)$. On peut écrire en tenant compte des signes :

$$\delta Q = k.S.\{\delta T(x+\Delta x,t)/\delta x - \delta T(x,t)/\delta x\}.\delta t \quad (1bis)$$

La seconde constatation expérimentale peut s'écrire de la façon suivante :

$$\delta Q = \rho \cdot c \cdot \delta T \cdot S \cdot \Delta x \quad (2)$$

c.-à-d. que la quantité de chaleur δQ qui a pénétré dans le petit volume $S \cdot \Delta x$, y a provoqué une augmentation de température δT . Les coefficients de proportionnalité ρ et c sont respectivement la densité de la substance et sa chaleur spécifique. Cette dernière exprime la quantité de chaleur qu'il faut pour élever d'un degré la température d'un kg de la substance. Pour les gaz qui sont compressibles, cette quantité est différente selon que l'opération se fait à volume ou à pression constante. Nous avons utilisé ci-dessous les valeurs correspondant au volume constant.

Enfin, le troisième fait physique, celui de la continuité, s'écrit en égalant les termes δQ des équations (1bis) et (2).

$$\rho \cdot c \cdot \delta T \cdot S \cdot \Delta x = k \cdot S \cdot \left\{ \frac{\delta T(x+\Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right\} \cdot \delta t \quad (3)$$

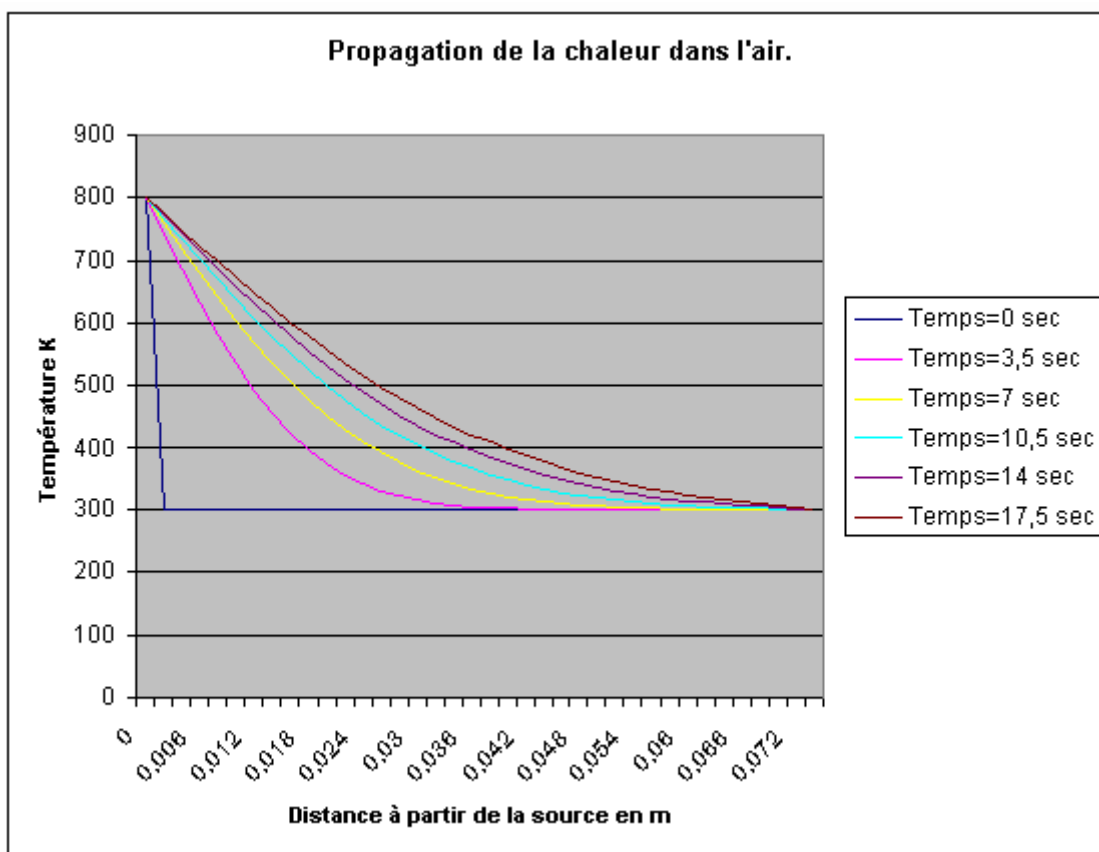
En réarrangeant cette équation en la divisant par δt , par $(\rho \cdot c)$, par S et par Δx , on obtient :

$$\delta T / \delta t = (k / (\rho \cdot c)) \cdot \left\{ \frac{\delta T(x+\Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right\} / \Delta x \quad (3bis)$$

Cette équation dit que la variation de température δT (en degrés) pendant le court laps de temps δt (en secondes) c.-à-d. la vitesse avec laquelle la température varie est proportionnelle à la variation de la pente de la température ($\delta T / \delta x$) sur la distance Δx . Le coefficient de proportionnalité est $k / (\rho \cdot c)$. Si on fait tendre Δx vers zéro, l'expression $\left\{ \frac{\delta T(x+\Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right\} / \Delta x$ devient la dérivée partielle seconde de T par rapport à x qui s'écrit $\delta^2 T / \delta x^2$. L'équation (3bis) devient finalement

$$\delta T / \delta t = (k / (\rho \cdot c)) \cdot (\delta^2 T / \delta x^2) \quad (3ter) \text{ qui est l'équation différentielle partielle de la chaleur.}$$

Cette équation permet de calculer le profil de température en fonction du temps, dans un tube isolé, rempli de gaz et terminé aux deux bouts par une source chaude et une source froide. Sa résolution n'est pas évidente. Pour ce faire, on utilise les fameuses séries harmoniques de Fourier. C'est ce que nous avons fait et voici le résultat. La source chaude à 800 K est à l'extrémité gauche du tube ($x = 0$). Au départ tout le gaz est à 300 degrés K.



c. Et le Stirling dans tout cela ?

L'équation (3ter) montre en tout cas que la vitesse $\delta T / \delta t$ avec laquelle la température varie en un point, est proportionnelle à la " constante " $k / (\rho \cdot c)$ du gaz utilisé. Et c'est là que l'hydrogène et l'hélium montrent une supériorité par rapport à l'air ou l'azote.

Pour l'air : $k / (\rho \cdot c) = 0,025 / (1,29 \times 718) = 0,000027 \text{ m}^2/\text{sec}$.

Pour l'hélium : $k / (\rho \cdot c) = 0,14 / (0,164 \times 3116) = 0,00027 \text{ m}^2/\text{sec}$ (10 fois plus que l'air).

Pour l'hydrogène : $k / (\rho \cdot c) = 0,18 / (0,083 \times 10183) = 0,00021 \text{ m}^2/\text{sec}$ (8 fois plus que l'air).

Plus vite la chaleur diffuse dans le gaz, plus vite on pourra faire tourner le moteur et gagner en puissance et/ou en rendement. Lorsqu'on résout l'équation (3ter) numériquement (voir le graphique), on est surpris de constater que la vitesse de diffusion chute rapidement à moins de 3 mm / sec ! C'est plus de 100.000 fois plus lent que la vitesse du son ou de la pression. Ce n'est vraiment pas rapide. Cela montre que dans un moteur Stirling, la totalité du gaz à réchauffer ou à refroidir doit être en contact très intime avec les échangeurs. C'est ce qui fait généralement défaut dans les moteurs insuffisamment étudiés qui ont un rendement et une puissance très inférieurs à ce qu'un calcul grossier laissait espérer.

Il est encore important de retenir que si on utilise de l'air ou de l'azote par exemple et que si le moteur ne tourne pas trop vite et que si les échangeurs sont efficaces sans trop de pertes de charge (= chutes de pression), de telle sorte que le gaz a le temps de s'échauffer et de se refroidir dans toute sa masse durant le cycle, il est tout à fait inutile de passer à l'hélium ou à

l'hydrogène si toutes les autres conditions restent les mêmes par ailleurs. Dans ce cas, la seule façon d'augmenter la puissance d'un moteur sans changer sa configuration ou sa vitesse initiale, est d'augmenter la pression moyenne interne du gaz, quel qu'il soit. Une mise en garde s'impose ici à l'attention de ceux qui aimeraient essayer cette technique sur un modèle. L'utilisation de l'air à haute pression dans un moteur Stirling peut provoquer l'explosion des vapeurs de l'huile de lubrification par effet diesel et la destruction du moteur. Ce genre d'explosion a déjà causé la mort d'expérimentateurs chevronnés, entre autres chez Philips. Mieux vaut s'en tenir à des pressions faibles quand on utilise de l'air ou passer à un gaz inerte tel que l'azote ou l'hélium si on veut utiliser de fortes pressions.

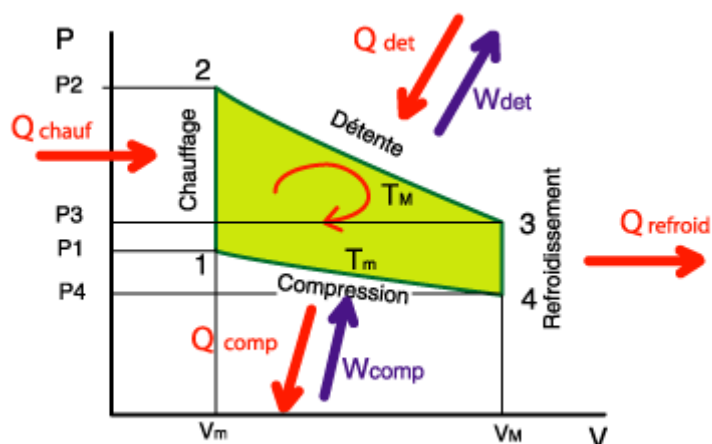
Enfin, il faut encore se rappeler que la vitesse de propagation de la chaleur dans le gaz n'est pas le seul facteur pour le rendement et la vitesse de rotation d'un moteur Stirling. Il y a encore le transfert de chaleur entre les échangeurs et le gaz. La vitesse de ce transfert est grosso modo proportionnelle à la différence de température et à la surface de l'échangeur. La théorie est fort complexe mais on constate en pratique que l'échange de chaleur est inversement proportionnel à la densité du gaz. On voit que, là aussi, l'hydrogène et l'hélium ont un net avantage sur l'air.

3.3.2. Les principes de base de la thermodynamique :

Pour comprendre le principe du fonctionnement du moteur Stirling, il est nécessaire de connaître peu de choses. On considère que le gaz utilisé (air, hydrogène, hélium, azote..) est un gaz "parfait", c'est à dire qu'il obéit à la loi, dite de Mariotte, suivante : pour une masse de gaz donnée et à température constante, le produit de la pression du gaz par son volume reste constant. On peut écrire cette loi de la façon suivante :

$PV = nRT$ où P représente la pression du gaz, V son volume, n la quantité de gaz, R la constante moléculaire du gaz et T la température du gaz.

Selon le bon vieux principe "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" on peut aborder les échanges d'énergie au cours d'un cycle de Stirling par exemple : toute perte d'énergie calorifique au cours d'un cycle est égale au gain en énergie mécanique au cours de ce même cycle.



Sur le diagramme ci-contre, on voit qu'on fournit en énergie calorifique : $Q_{det} + Q_{chauf}$
Par contre, on récupère $Q_{refroid} + Q_{comp}$
En énergie mécanique, on récupère W_{det}
mais on fournit W_{comp}
Le bilan global devient donc, en stipulant que l'énergie calorifique perdue a été transformée intégralement en énergie mécanique :

$$Q_{\text{det}} + Q_{\text{chauf}} - Q_{\text{refroid}} - Q_{\text{comp}} = W_{\text{det}} - W_{\text{comp}}$$

Ceci nous amène à parler de rendement mécanique : c'est le rapport entre l'énergie mécanique récupérée (le but du moteur, en fait) et l'énergie calorifique qu'on doit fournir :

$$\text{rendement} = (W_{\text{det}} - W_{\text{comp}}) / (Q_{\text{det}} + Q_{\text{chauf}})$$

Ce rendement peut s'écrire aussi en fonction des températures des sources chaudes et froides selon la formule suivante :

$$\text{rendement} = 1 - T_m / T_M$$

3.3.3. La cinématique en quelques équations :

On suppose, tout d'abord, que les mouvements des pièces mobiles du moteur sont la conséquence de la rotation uniforme ($\omega = \text{constante}$) d'un arbre moteur de 0° à 360° à chaque cycle. Sur le schéma ci-contre, on voit la représentation d'un mécanisme bielle-manivelle.

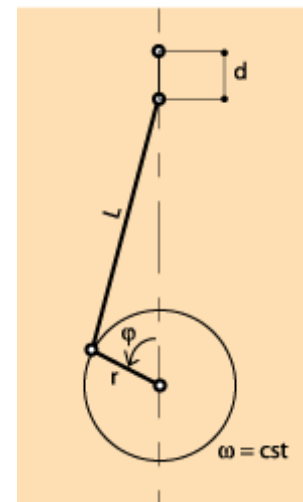
En supposant λ petit, quand l'angle parcouru est φ , la valeur de d est :

$$\mathbf{d} = \mathbf{r} (1 - \cos\varphi) + 0,5\lambda \mathbf{r} \sin^2 \varphi \quad (4) \quad \text{où } \lambda = \mathbf{r}/\mathbf{L}$$

Quand on connaît la section du piston S , il est facile de déterminer le volume V de gaz situé au dessus du piston à chaque instant, pour un angle φ donné.

$$\mathbf{V} = \mathbf{d} \mathbf{S}$$

Et puisque l'angle φ dépend de ω , on peut ainsi calculer, grâce à l'équation (4), le volume du piston et la longueur L pour que l'on ait une vitesse de rotation maximale.



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions sur le travail réalisé

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

Perspectives pour la poursuite de ce projet

Comme nous l'avons vu tout au long de ce rapport les avantages du moteur Stirling sont nombreux : silence de fonctionnement, rendement élevé à très élevé, multitude de sources de chaleur possibles (combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique), aptitude écologique à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique, fiabilité et maintenance aisée, et une durée de vie importante.

Néanmoins le moteur Stirling connaît quelques inconvénients dont son prix (le coût de fabrication n'est pas encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés), sa méconnaissance par le grand public et quelques problèmes techniques d'étanchéité difficiles à résoudre.

Actuellement des moteurs Stirling sont utilisés dans des satellites artificiels, des pompes à chaleur, des appareils frigorifiques (Phillips) et des groupes électrogènes. C'est certainement dans le domaine domestique que le moteur Stirling se développera le plus. Il pourra permettre de produire électricité, eau chaude et chauffage. L'énergie primaire assurant la chaleur pourra être le soleil (paraboles), le bois ou des déchets divers (déchets de céréales, bouses...).

En raison de son rendement très élevé le moteur Stirling fait de nos jours l'objet de nombreuses études scientifiques. Ainsi la NASA a développé et mis à contribution les performances de ce moteur pour les projets spatiaux.

Pour conclure ce projet de P6 nous a permis d'avoir un aperçu de ce que sera le travail en équipe dans notre future vie professionnelle.

Le travail en équipe présente ainsi de nombreux avantages comme le partage des tâches, des connaissances, et des opinions. Notre groupe étant issu de thématiques différentes cela nous a permis d'amener chacun une part de nos connaissances.

5. **BIBLIOGRAPHIE**

<http://www.moteurstirling.com/>

<http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/stirling.html>

<http://www.photologie.fr/>

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Thermo/Machines/Stirling1.html>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling

6. PROPOSITIONS DE SUJETS DE PROJETS :

- Etude physique d'un crash entre deux voitures.
- Etude d'une fibre optique.
- Réalisation d'un moteur solaire.