

Défense et illustration du moteur Stirling

par **Alain CAILLATE**

Lycée Gustave Eiffel - 21074 Dijon Cedex

alaincaillate@hotmail.com

RÉSUMÉ

L'enseignement de la thermodynamique est souvent difficile à faire passer de façon concrète, entre autre parce que l'aspect expérimental n'est hélas pas aussi accessible que dans les autres domaines de la physique ou de la chimie.

Oui mais, il y a le moteur Stirling !

Et avec lui, on peut rendre concrètes de nombreuses notions de thermodynamique, faire le lien entre les aspects pédagogiques et les aspects industriels, vérifier les modèles, utiliser toutes sortes de capteurs interfaçables et même, faire du développement durable...

INTRODUCTION

Le moteur Stirling est revenu sur le devant de la scène depuis quelques années. Il a fait l'objet de plusieurs excellents articles dans le BUP [1, 2, 3], de plusieurs sujets de concours (Centrale 1999, VETO 2001, CAPES 2003, Banque PT 2003). Il a permis au lycée Jean Jaurès du Creusot (Saône-et-Loire) d'obtenir le prix SFEN (Société française d'énergie nucléaire) en 1999 [3]. L'ENSM (École nationale supérieure de mécanique et des microtechniques) de Besançon en a fait construire à ses étudiants en 2002. Des fabricants de matériel comme PHYWE ou LEYBOLD en distribuent. La marine suédoise en a équipé le sous-marin Gotland...

Je voudrais dans cet article rappeler les éléments essentiels à la compréhension de ce moteur, apporter quelques compléments et références bibliographiques, et, surtout, présenter un TP avec un moteur très économique.

1. LA THERMODYNAMIQUE DU PROFESSEUR ET CELLE DE L'INDUSTRIEL

1.1. Le cycle Stirling

Le moteur Stirling est un moteur thermique ditherme dans lequel un fluide, de l'air par exemple, décrit un cycle modélisé par deux transformations isothermes (une com-

pression AB et une détente CD) et deux transformations isochores (un réchauffement BC et un refroidissement DA), idéalement toutes réversibles.

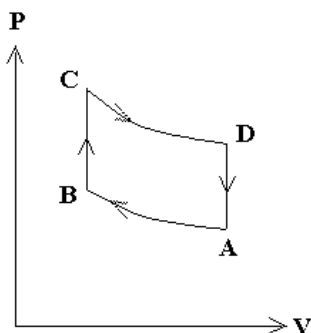


Figure 1 : Cycle de Stirling.

En pratique, quand on parle de moteur cyclique ditherme, on pense plutôt instantanément à celui de Carnot, constitué de deux adiabatiques et deux isothermes. Nous allons voir que les transformations isothermes et adiabatiques sont en effet les seules que l'on puisse « imaginer » réaliser simplement de façon réversible, mais que ces transformations sont des cas limites, irréalisables en pratique, dans des conditions industrielles.

1.2. Transformation isotherme d'un fluide

Lors d'une transformation isotherme, le fluide doit être en contact thermique parfait avec la source, elle-même de capacité thermique infinie. De la sorte, lorsque l'on comprime par exemple un gaz parfait contenu dans un cylindre parfaitement conducteur de la chaleur, ce gaz « refuse » de s'échauffer (c'est-à-dire élévation de température) et d'acquiescer ainsi de l'énergie interne. Il transforme alors tout le travail reçu en chaleur, aussitôt évacuée vers l'extérieur « avant même que sa température n'ait eu le temps d'augmenter ». On conçoit que ce soit là une transformation un peu idéale, mais dont il soit possible d'approcher les conditions de réalisation en ralentissant à l'extrême le processus, c'est-à-dire en effectuant la transformation de façon quasistatique réversible (ou q.s.r.).

1.3. Transformation adiabatique d'un fluide

Lors d'une transformation adiabatique q.s.r, le fluide s'échauffe, cette fois, en recevant du travail lors d'une compression (ou se refroidit en en fournissant dans le cas d'une détente), mais il ne peut transmettre d'énergie thermique vers l'extérieur car les parois du récipient qui le contient sont parfaitement calorifugées⁽¹⁾. Ce genre de transformation semble pouvoir être réalisé si les échanges énergétiques se font assez rapidement pour

(1) Contrairement à une confusion fréquente chez les étudiants, il apparaît que les conditions d'une transformation isotherme sont exactement opposées à celles d'une transformation adiabatique.

que les fuites thermiques puissent être négligées mais assez lentement pour que la transformation puisse être qualifiée de q.s.r : la pression et la température doivent être uniformes dans l'ensemble du système. Il faut éviter toute inhomogénéité ainsi que tout frottement, toute viscosité du gaz, etc.

1.4. Transformation polytropique d'un fluide

Dans la réalité, les transformations d'un gaz parfait sont en général intermédiaires entre isotherme q.s.r parfaite ($PV = \text{cte}$) et adiabatique q.s.r parfaite ($PV^\gamma = \text{cte}$). On dit qu'elles sont polytropiques. Au cours de la transformation, le gaz, supposé parfait, échange alors avec l'extérieur une quantité de chaleur proportionnelle à sa variation d'enthalpie ⁽²⁾ : $\delta Q = a \cdot dH$.

On obtient alors la relation $PV^k = \text{cte}$ dans laquelle, l'exposant polytropique vaut :

$$k = \frac{\gamma(1-a)}{1-a \cdot \gamma}$$

On voit bien que le cas limite $a = 0$ correspond à $\delta Q = 0$ donc à une adiabatique parfaite. En remplaçant dans l'équation précédente, on trouve bien $k = \gamma$. De même, le cas limite $a \rightarrow \infty$ correspond à une isotherme pour laquelle $k = 1$.

Plus intéressant encore, si un gaz parfait de capacités calorifiques C_v (à volume constant) et C_p (à pression constante) est contenu dans un récipient de capacité calorifique C avec lequel il est en contact thermique parfait, l'exposant polytropique vaut :

$$k = \frac{C + C_p}{C + C_v}$$

Cette relation est intéressante car elle montre que si la capacité thermique du récipient est infinie, celui-ci se comporte comme une source thermique parfaite imposant sa température, k vaut 1 et on est bien en présence d'une isotherme. En revanche, si la capacité thermique du récipient est nulle, le gaz se retrouve comme isolé, puisque entouré de cloisons que l'on peut considérer comme infiniment minces. La transformation devient adiabatique avec $k = \frac{C_p}{C_v} = \gamma$.

La transformation polytropique est donc plus proche de la réalité que les transformations idéales isotherme ou adiabatique qui apparaissent ainsi comme des cas limites, idéaux. De plus, on peut également définir un rendement polytropique de façon à tenir compte de l'irréversibilité (pour une compression, il s'agira du rapport du travail obtenu de façon q.s.r au travail obtenu réellement et du rapport inverse pour une détente).

1.5. Retour sur le cycle de Carnot

On le voit, le moteur de Carnot est une merveilleuse construction... intellectuelle. Il ne

(2) Ou à sa variation d'énergie interne puisque pour un gaz parfait $dH = \gamma \cdot dU$.

nécessite effectivement que deux sources thermiques : l'une, dite « chaude », à la température T_1 , l'autre, dite « froide », à la température T_2 . On les met tour à tour en contact thermique parfait avec le fluide (isothermes) et, entre deux isothermes, on les escamote, pour laisser le fluide, désormais isolé thermiquement, se détendre ou se comprimer de façon adiabatique.

- 1) Mais d'où vient l'énergie mécanique nécessaire aux compressions ?
- 2) Comment mettre en contact les sources avec le fluide ?
- 3) Comment bloquer parfaitement ou autoriser parfaitement les échanges thermiques ?

Sadi CARNOT, dans ses « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* », a fait l'étude d'une machine thermique théorique idéale, cyclique, réversible, en vase clos mais irréalisable telle quelle. Il n'a pas cherché à modéliser une machine réelle [5]. Son moteur possède bien le rendement maximal qu'on puisse atteindre avec deux sources thermiques mais la durée du cycle est infinie et le rendement pratique (en puissance) est donc nul ! Par contre c'est une excellente machine à faire réfléchir (les étudiants, entre autres) dans le but d'élaborer de véritables machines thermiques industrielles.

1.6. Le dilemme du professeur

Le moteur à explosion, contrairement à celui de Carnot, est un moteur thermique dans lequel les transformations ne sont pas réversibles, les sources de chaleur ne sont pas externes, (puisque c'est une combustion interne qui apporte l'énergie au sein même du mélange) dans lequel le fluide ne décrit pas des cycles, du fait même de la combustion⁽³⁾. Ce système est en outre ouvert : il y a une admission, un échappement et donc des travaux de transvasement. Autant dire que ces deux moteurs n'ont pas beaucoup de points communs, et les théories qui les décrivent non plus !

Car si le premier principe s'énonce en classe de Préparatoire première année avec l'énergie interne et le travail (généralement limité aux forces de pression) pour les systèmes fermés, il s'énonce industriellement (ou en CPGE deuxième année) avec l'enthalpie massique et le travail utile pour les systèmes ouverts (c'est le premier principe « industriel »), avec une définition révisée du rendement.

On se retrouve donc face au dilemme suivant : faut-il enseigner, en première année, de la thermo-prof fortement éloignée de la réalité ou enseigner de la thermo-réalité fortement éloignée des programmes et qui ne permettra peut-être pas de résoudre le premier exercice de colle venu ?

C'est là qu'intervient le moteur de Stirling : il concilie les deux points de vue⁽⁴⁾. C'est un moteur à « combustion » externe⁽⁵⁾ dans lequel le fluide décrit réellement des cycles, en vase clos, dans des conditions assez proches de la réversibilité, pouvant conduire

(3) Je ne crois pas qu'il soit possible de réinjecter en boucle les gaz d'échappement dans le carburateur !

(4) Il réconcilie également les ingénieurs et les professeurs !

(5) Il n'y a d'ailleurs pas obligatoirement besoin de combustion, comme on le verra par la suite.

dans certains cas au rendement théorique de Carnot (moteurs à régénérateurs).

2. LA CONTRIBUTION DE ROBERT STIRLING

2.1. Problématique de développement durable avant l'heure

Robert STIRLING, pasteur Écossais né en 1790 était bouleversé par les accidents souvent mortels dus aux premières machines à vapeur : fuites de vapeur, explosion... Il chercha à mettre au point un moteur économique, fiable, robuste, simple, écologique et, surtout, moins dangereux. Il déposa un premier brevet en 1816.

Ce moteur fut amélioré, mais peu à peu supplanté par les moteurs à gaz (ancêtres du moteur à essence) et le moteur Diesel, mais il revient actuellement sur le devant de la scène pour des raisons que nous allons examiner maintenant.

2.2. Avantages

Large choix de carburants

Dans ce type de moteur, la combustion a lieu à l'extérieur du ou des cylindre(s), de façon continue, sans explosion ce qui la rend facile à contrôler. Le choix du combustible peut être dicté par des considérations tant économiques qu'écologiques : combustion de gaz divers, de bois, de sciure, de paille, de déchets, d'essence, voire de combustible nucléaire. On peut également valoriser l'énergie thermique rejetée par une centrale nucléaire dans une rivière, exploiter l'énergie solaire ou géothermique⁽⁶⁾. Nous verrons plus loin que la source chaude peut même être l'atmosphère, la source froide étant alors constituée d'un bloc de glace⁽⁷⁾ !

Silence et absence de pollution

L'air⁽⁸⁾ (ou tout autre fluide) évolue en circuit fermé. Pas de pollution de l'atmosphère, pas de bruit d'échappement, de soupapes, très peu de vibrations. Silence total ! « Indétectable », on comprend qu'il soit retenu pour équiper certains sous-marins suédois ou australiens.

Fiabilité et longévité

Sa simplicité technologique permet d'avoir des moteurs de grande fiabilité et de maintenance aisée. On imagine ce qu'un moteur ne nécessitant aucune maintenance pendant dix ans peut apporter dans un pays en voie de développement !

(6) Le moteur distribué par la société LEYBOLD reçoit même la chaleur par effet Joule. Énergétiquement, c'est aberrant, pédagogiquement, c'est discutable, mais pour faire des mesures, c'est très pratique. On peut faire tourner le moteur décrit plus loin, en le tenant dans la main, quand il ne fait pas trop chaud.

(7) On pourrait même imaginer d'exploiter les ressources en glace de la planète !

(8) C'est pourquoi on trouve souvent la dénomination : « Moteur à air chaud ».

Rendement élevé et « réversibilité »

À l'heure actuelle, on a atteint un rendement de 40 %. La machine Stirling est réversible et peut fonctionner en pompe à chaleur et en réfrigérateur. On a atteint récemment de très basses températures de cette façon.

La NASA (National aeronautics and space administration), ainsi que PHILIPS ont beaucoup contribué au développement et à l'amélioration des machines Stirling. On en trouve ainsi dans les satellites, les scieries des pays nordiques, les bâtiments militaires de surface (bateaux de détection de mines ou de surveillance acoustique), les groupes électrogènes...

2.3. Inconvénients

Inertie

L'inconvénient majeur est que ces moteurs ne peuvent avoir que des variations de vitesse très lentes : ils sont longs à démarrer et à arrêter, ce qui correspond bien aux utilisations mentionnées ci-dessus. En effet, il n'y a pas d'explosion, donc pas d'expansion brusque des gaz. La détente est alors très tributaire de la qualité des échanges thermiques.

Étanchéité

L'étanchéité n'est pas un souci lorsque le fluide est de l'air, mais elle le devient lorsque c'est de l'hélium voire du dihydrogène, gaz choisi pour sa légèreté et sa bonne conductibilité thermique. On déplore hélas des accidents avec du dihydrogène sous pression.

Prix élevé

Leur prix élevé vient du fait d'un manque de recherches dans ce domaine. Ils sont d'ailleurs souvent un peu ignorés des manuels d'enseignement.

Nous allons maintenant entrer dans la description d'un TP réalisé avec un moteur Stirling à faible gradient de température (type Senft).

3. DESCRIPTION DU MOTEUR

3.1. Un piston original : le déplaceur

Dans le moteur de Stirling utilisé, il existe deux sources thermiques (ou thermostats). Une idée originale consiste, pour mettre alternativement l'air en contact avec



Figure 2 : Vue d'ensemble du moteur.

ces sources, à déplacer cet air. C'est le rôle du piston déplaceur. Ce piston est en polystyrène (léger et isolant thermique), assez volumineux et son diamètre est un peu plus faible que celui du cylindre (au format boîte de Vache qui rit) dans lequel il se déplace.

Lorsqu'il se déplace vers le bas, il force l'air à se rendre en haut du cylindre et réciproquement. Les bases de ce cylindre sont métalliques, assez épaisses, en bon contact avec l'air par une face, et avec une source thermique par l'autre face. La paroi latérale du cylindre est, elle, en plastique, bon isolant thermique. Ainsi, le mouvement de va-et-vient du déplaceur va-t-il permettre la mise en contact tour à tour de l'air avec les deux sources. Il fallait y penser ! C'est la solution apportée au problème soulevé au 1.5.2).

Pour l'instant, nous supposons que la source inférieure est la source chaude et que la source supérieure est la source froide (atmosphère ambiante).

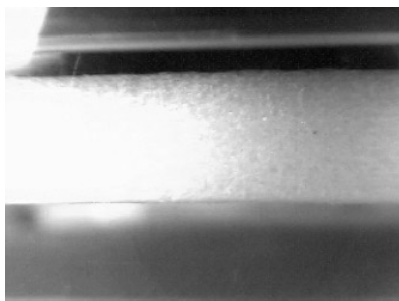


Figure 3 : Gros plan sur le déplaceur.

Supposons que, le moteur tournant, un embellage astucieux permette d'obtenir au cours du temps un mouvement trapézoïdal du déplaceur. Les points morts haut et bas vont alors correspondre à des transformations au cours desquelles l'air restera « un certain temps » en contact avec chaque source. Ce seront donc des polytropiques AB et CD, proches d'isothermes.

3.2. Le piston moteur

Le piston moteur coulisse hermétiquement, quant à lui, dans un petit cylindre (format tube de rouge à lèvres) qui coiffe le précédent. Il a le même mouvement que le piston déplaceur, avec un déphasage de 90° . Si l'on garde l'approximation du mouvement trapézoïdal, on conçoit qu'il restera lui aussi un certain temps quasi-immobile, stationnaire, aux points morts haut et bas tandis que l'air sera en train de passer rapidement d'une source à l'autre sous l'effet du mouvement du piston déplaceur (les deux pistons étant déphasés de 90°). Ceci correspond bien à un réchauffement BC ou à un refroidissement DA progressifs de l'air, à volume constant⁽⁹⁾. En effet, le volume de l'air varie uniquement sous l'effet du déplacement du piston moteur.

(9) Il est à noter qu'au cours de ces transformations isochores la température de l'air n'est pas uniforme. Il s'en suit une irréversibilité certaine.

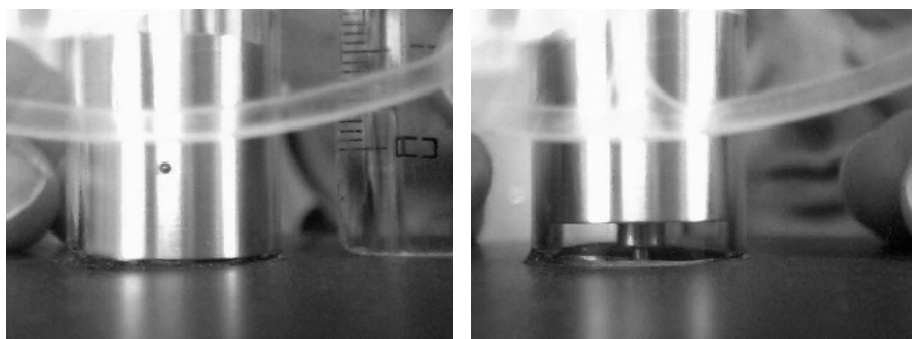


Figure 4 : Gros plans sur le piston moteur en positions extrêmes.

L'embellage de ces deux pistons est bien visible sur la figure 2 et leurs mouvements sur la figure 5.

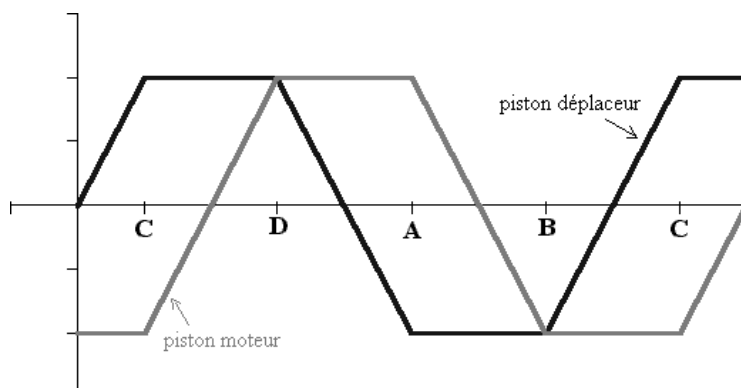


Figure 5 : Déplacements idéalisés des deux pistons.

Détaillons les explications précédentes :

- ♦ Sur le trajet AB, le piston moteur descend. Le volume diminue. C'est une compression du gaz. Elle est quasi-isotherme, car, comme le piston déplaceur se trouve stationnaire en bas durant AB, l'air, lui, est en haut, au contact de la source froide. On a donc bien, comme à la figure 1, une compression isotherme à la température de la source froide.
- ♦ Sur le trajet BC, le piston moteur est stationnaire, en bas. Le volume est donc constant et minimum. Le piston déplaceur monte, refoulant l'air vers le bas, où il est mis en contact avec la source chaude. On a donc bien un réchauffement isochore du gaz, au volume minimum, durant cette transformation. Ceci correspond bien au réchauffement isochore BC de la figure 1.

On vérifiera sans peine que les déplacements des pistons permettent de rendre

compte également des deux dernières transformations et que le piston déplaceur est, dans cette expérience, en avance d'un quart de période (90°) sur le piston moteur.

3.3. Le volant d'inertie

Ce moteur ne possède qu'un « temps » moteur sur les quatre : la détente polytropique CD. Il est donc nécessaire de lui fournir de l'énergie mécanique pour assurer la compression AB. Il faut également mettre en mouvement le piston déplaceur. Plutôt que d'utiliser un vilebrequin et quatre moteurs Stirling couplés, on emploie un volant d'inertie. Celui-ci emmagasine lors de la détente un peu d'énergie cinétique dont il restituera une partie pour la compression. C'est la solution apportée à la question 1.5.1).

Remarque : En pratique, seuls les moteurs Stirling « Ringbow au piston libre » permettent un embiellage trapézoïdal et des isochores parfaites [4].

Dans notre cas, cette approximation relève plutôt de la pédagogie. C'est un « modèle sympathique ». Les mouvements des pistons sont en réalité proches de la sinusoïde, la longueur de la bielle étant bien supérieure au rayon de l'excentrique, c'est-à-dire à la moitié de la course des pistons.

4. SILENCE, ON TOURNE !

4.1. Du recyclages des packs de lait

Poser le moteur bien à plat sur un pack de lait rempli d'eau chaude (ou une bouillotte). Attendre quelques secondes l'établissement d'un bon contact thermique. Lancer le disque doucement dans un sens. Si on a de la chance, c'est le bon sens et le moteur continue de tourner. Sinon, il ralentit et s'arrête. Le moteur peut tourner ainsi plus d'une heure ! Peu à peu, la plaque supérieure s'échauffe, preuve que la chaleur est bien transférée vers le gaz puis rejetée en partie vers la source froide, l'autre partie étant transformée en travail mécanique. Le silence dans la salle est total : les étudiants hypnotisés, le moteur parfaitement silencieux également.

On peut poser le moteur sur une surface thermiquement isolante (polystyrène). Il continue de tourner un peu grâce à l'énergie thermique emmagasinée dans la plaque inférieure. On peut alors l'arrêter à la main, mais dès qu'on le lâche, il repart, preuve que ce n'est pas l'inertie mécanique qui prolonge sa rotation. Si on le pose sur une surface métallique à la température ambiante, au contraire, la chaleur de la plaque inférieure fuit vers cette surface. Le moteur ralentit et s'arrête. On peut constater que plus l'écart de température entre les deux thermostats est faible, plus le moteur tourne lentement⁽¹⁰⁾.

(10) Cependant, ne nous hâtons pas de conclure que le rendement augmente avec l'écart de température entre les sources, « conformément à la théorie ». Le moteur tourne moins vite, ce qui signifie qu'il développe moins de puissance. Qu'il développe moins de travail à chaque tour, c'est autre chose ! Qu'il transforme moins de chaleur en travail en est encore une autre... Même si le rendement était indépendant de la température, en admettant que les frottements augmentent avec la vitesse de rotation (donc le nombre de cycles par seconde), le moteur ralentirait si l'écart de température entre les sources diminuait.

Poser maintenant le moteur sur un pack de lait contenant de la glace. Le moteur tourne dans l'autre sens, ce qui s'explique facilement, puisque la source chaude est désormais l'atmosphère extérieure, toujours en contact avec la face supérieure. On verra plus loin que, expérimentalement, le cycle reste parcouru dans le même sens, $A'B'C'D'$, caractéristique d'un moteur thermique. Comme l'atmosphère ambiante constitue désormais la source chaude et non plus la source froide, C' correspond à B et D' à A .

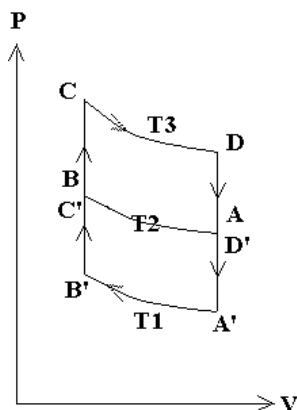


Figure 6 : Les deux cycles « siamois » moteurs possibles avec de l'eau chaude (T3), de la glace (T1) et de l'air à la température ambiante T2.

4.2. Pour quelques degrés de plus

Le premier moment d'étonnement passé, on peut aussi montrer que le moteur tourne dans la paume de la main (comme sur la figure 2), posé sur un oscilloscope tiède, soumis à un flux lumineux (halogène braqué vers la face supérieure noircie), dans un freezer, etc. Attention aux idées fausses qui peuvent alors germer : on a trouvé le mouvement perpétuel, il suffit d'une seule source de chaleur, etc.

Ce qui me semble très pédagogique par rapport à d'autres réalisations, c'est que l'on n'est pas obligé d'avoir recours à une flamme (de bougie par exemple) dont la température est mal définie et qui est énergétiquement plus « agressive ». Ici, le moteur reçoit de l'énergie sous forme thermique de la part de la source chaude, il en cède une partie sous forme mécanique et le reste sous forme thermique à la source froide. Le rendement est facile à définir :

$$\eta = \frac{\text{recette}}{\text{dépense}}$$

C'est-à-dire :

$$\eta = \frac{|\text{travail}|}{\text{énergie prise à la source chaude}}$$

Éventuellement, avec le moteur à glace, on pourrait poser :

$$\eta = \frac{|\text{travail}|}{\text{énergie cédée à la source froide}}$$

puisque la dépense vient de la glace à fournir pour maintenir froide la source froide !

Résumé : Avec le pack d'eau chaude, l'air chaud se dilate, repousse le piston moteur vers le haut, ce qui entraîne la rotation du volant d'inertie. Le volant, lancé, repousse alors le piston déplaceur vers le bas, ce qui refoule l'air vers le haut, où il se refroidit ensuite. L'air, une fois refroidi, se contracte, le piston moteur descend⁽¹¹⁾, l'inertie du volant permet alors au piston déplaceur de remonter, chassant l'air vers le bas où il va se réchauffer. Puis tout recommence. Un bon exercice consiste à reprendre ces explications lorsque le pack contient de la glace...

Nous allons maintenant passer à des expériences un peu plus quantitatives.

5. MESURES SUR LE MOTEUR

5.1. Capteurs de température et de pression

Chacun pourra utiliser les capteurs qu'il voudra. J'utilise des LM35 CZ pour mesurer la température des sources. Mais n'oublions pas que la température n'est pas uniforme à l'intérieur. Pour la pression, nous avons fait un petit trou de 3 mm de diamètre dans la plaque supérieure à 1 cm du bord. Nous le relions à un pressiomètre au moment de faire les mesures. Les lycées sont équipés en pressiomètres qui donnent par exemple 1 mV par hPa. Le nôtre permet d'obtenir 4 mV/hPa.

L'observation de la pression au cours du temps confirme bien l'existence de compressions et de détentes avec une variation typique extrême de pression de ± 10 hPa, soit environ ± 1 % de la pression atmosphérique.

Pour une transformation adiabatique de l'air (seul) cela conduirait à :

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\delta P}{P} \approx \pm \frac{0,4}{1,4} \times 0,01$$

Donc, à température ordinaire (300 K), si l'on fait tourner le volant à la main, **les deux armatures étant à la même température**, $\delta T \approx \pm 1$ K. Un tel écart serait facilement mesurable. En fait, la capacité calorifique des plaques en contact avec le gaz absorbe une certaine partie de cette chaleur. La transformation observée est alors polytropique, proche de l'isotherme.

5.2. Fonctionnement en réfrigérateur et en pompe à chaleur

On a vu que si on entraîne le volant à l'aide d'un moteur auxiliaire, on observe l'échauffement d'une plaque et le refroidissement de l'autre. Ceci correspond à une pompe à chaleur, du point de vue de la source chaude, et à une machine frigorifique, du point de vue de la source froide. Mais les écarts de température observés sont minimes, ce qui est bien justifié par la théorie (cf. annexe).

(11) Ce n'est pas un temps moteur en ce qui concerne le gaz : la force pressante qui s'exerce sur le piston vient de l'air extérieur.

Le protocole expérimental est le suivant : on fait tourner le volant à l'aide d'un petit moteur électrique auxiliaire, dans un certain sens, à environ 100 tr/min, cinq minutes. On relève les températures des deux plaques (le fond est isolé, pas le couvercle) et la température ambiante. Il n'y a pas de grosses variations. On inverse alors le sens de rotation et alors, toutes les cinq minutes, la température chute régulièrement de $0,1^\circ$. Au-delà d'un quart d'heure, il faut être patient car une certaine homogénéisation tend à se faire... Le plus simple est de repartir dans le sens initial. Re- $0,1^\circ$ toutes les cinq minutes, mais dans l'autre sens. Et re-re-belote pour les durs à convaincre...

Ces températures sont mesurées sur un voltmètre grâce aux capteurs LM35 CZ.

5.3. Capteur de volume

De nombreuses réalisations sont possibles : cuve rhéographique, potentiomètre rectiligne ou circulaire sans butée, codeur optique incrémental, coupleur optoélectronique, barrière photoélectrique, capteur à effet Hall, souris (informatique) trafiquée, capteur de déplacement à ultrasons, à webcam, etc.

Nous avons cherché à intervenir le moins possible au niveau du moteur. La solution retenue est la suivante.

Le piston moteur (qui coulisse dans un cylindre transparent (cf. figure 4) est éclairé par un faisceau de lumière parallèle issu d'une lanterne de projection. L'extrémité de l'ombre du piston en mouvement balaye la surface sensible d'une photorésistance disposée au plus près, en série avec une résistance de $1\text{ k}\Omega$, le tout alimenté sous 8 V. La tension aux bornes de la photorésistance varie alors dans le même sens que le déplacement du piston moteur, donc que le volume offert au gaz. La constante de temps de la photorésistance n'intervient pas, étant donnée la faible vitesse de rotation du moteur ($< 3\text{ tr/s}$).

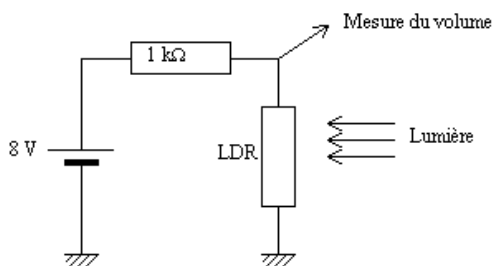


Figure 7 : Schéma de montage du capteur de volume.

Ce capteur n'est pas linéaire⁽¹²⁾. On pourrait envisager de focaliser la lumière sur une photodiode correctement polarisée, ce serait mieux. On pourrait aussi utiliser des fourches optiques larges à infrarouges (HOAD0150-2 chez RADIOSPARES) ou un convertisseur lumière-tension linéaire TSL 260...

(12) Il faudrait déjà réaliser un masque rectangulaire sur la photorésistance.

Mais en fait, une mesure préalable du déplacement du piston moteur⁽¹³⁾ en fonction de l'angle de rotation du volant va permettre de linéariser la réponse de ce capteur. Cette mesure correspond d'ailleurs parfaitement à la formule théorique :

$$z = R \cdot \cos(\theta) + \sqrt{L^2 - R^2 \cdot \sin^2(\theta)}$$

avec $R = 2,6$ mm (rayon de l'excentrique) et $L = 50$ mm (longueur de la bielle).

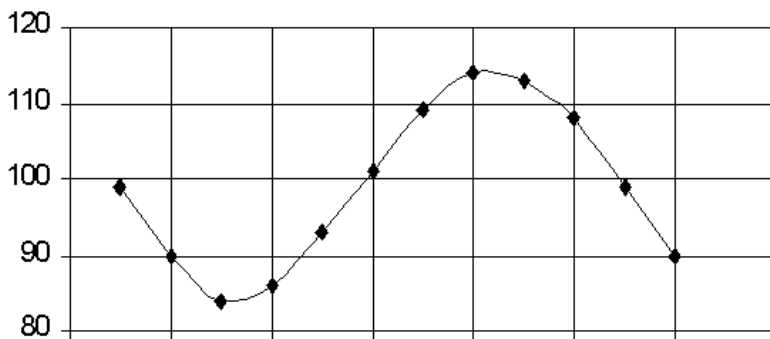


Figure 8 : Positions du piston moteur (mesurées en pixels avec une webcam) en fonction de l'angle.

En régime établi, le moteur tourne à vitesse angulaire constante. En faisant coïncider les passages au minimum et au maximum du volume donné par le capteur optique et de la courbe $z(\theta)$, on peut déterminer la position exacte du piston à chaque instant. On vérifie que le capteur n'est effectivement pas linéaire, mais cela n'a pas beaucoup d'importance, puisqu'on sait corriger ce défaut :

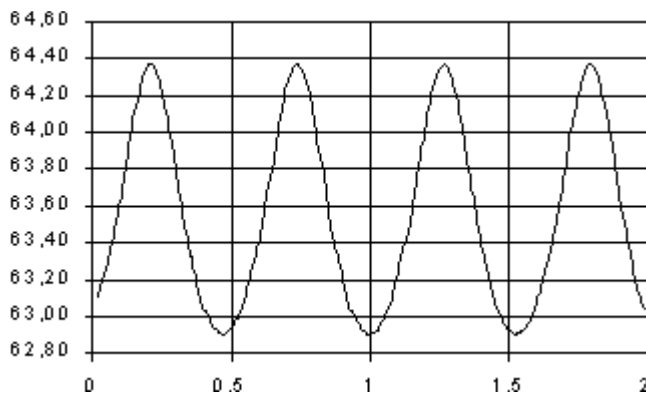


Figure 9 : Volume mesuré en fonction du temps.

(13) Relevé avec une webcam ou un comparateur.

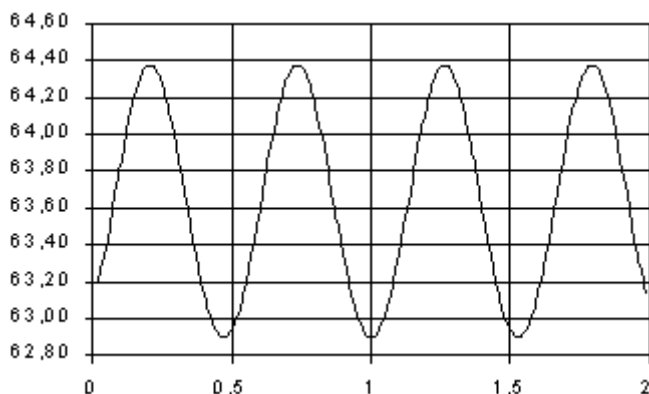


Figure 10 : Volume recalculé en fonction du temps.

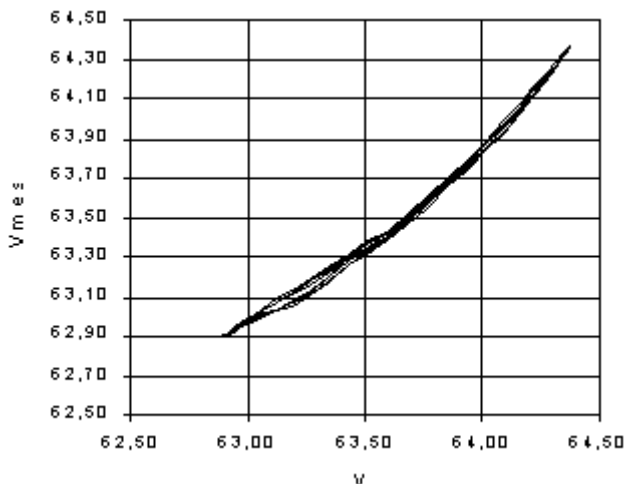


Figure 11 : Courbe montrant la non-linéarité du capteur de volume.

5.4. Diagrammes de Clapeyron

Nous en arrivons    la partie la plus spectaculaire de la manipulation. En reliant les capteurs de pression et de volume    un oscilloscope, en mode XY, on obtient le diagramme du cycle dans les axes de Clapeyron (*cf.* figure 12).

On constate bien    l'écran que le cycle est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre, et ce, tandis que le moteur tourne dans un sens (avec de l'eau chaude) ou dans l'autre (avec de la glace).

Si l'on freine le moteur, on constate que la surface du cycle augmente (et qu'il est décrit plus lentement, bien sûr). Au fur et    mesure qu'il reprend de la vitesse, la surface

se réduit, le travail fourni par le gaz pour « recharger » le volant en énergie cinétique diminue. On sait en effet que la surface du cycle représente le travail échangé entre le gaz et l'extérieur au cours d'un cycle. En effet, quand le moteur tourne très lentement (lorsque l'écart de température entre les sources est élevé, mais qu'on le freine), les échanges thermiques ont davantage de temps pour s'effectuer, la température du gaz a plus le temps de s'approcher de celle des sources. Il en résulte des variations de pression plus importantes. Comme les valeurs limites du volume sont immuables, la pression moyenne lors de la compression est plus basse et la pression moyenne lors de la détente est plus élevée : les branches s'écartent et la surface du cycle augmente. Les isochores sont alors davantage perceptibles. Si l'on aide le moteur à tourner, au contraire, on voit le cycle se refermer.

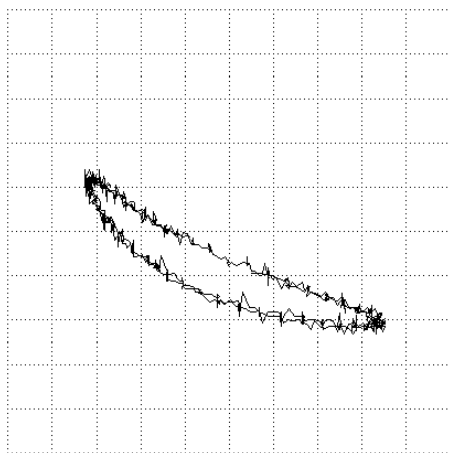


Figure 12 : Tout ça pour ça !

On peut être un peu déçu de la forme du cycle : les isochores sont réduites à peu de chagrin. En effet, n'oublions pas que le mouvement des pistons est quasi-sinusoidal et non pas trapézoïdal ! La théorie de SCHMIDT [6] donne, dans ces conditions, un diagramme très semblable à celui qui est obtenu ici.

On remarque aussi quelques parasites. On a intérêt à soigner le montage, avec des fils courts ou blindés. Un filtre RC (10 k Ω , 200 nF) permettra aussi d'éliminer des parasites sans déformer le tracé moyen du cycle ($f_c \gg 3$ Hz).

Une carte d'acquisition et son logiciel de traitement de données, ou un tableur classique, vont permettre d'aller plus loin.

5.5. Utilisation d'une carte d'acquisition et d'un tableur

On relie les capteurs à une carte d'acquisition. Désormais, toutes les mesures vont pouvoir être conservées, analysées, décortiquées, modélisées, imprimées, lissées, moyennées, etc. Une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz est un bon compromis entre les différentes exigences.

Sur la figure 16, le « cycle n'est pas fermé », sa surface est en train de diminuer (unités arbitraires). On peut, avec le tableur, évaluer la surface du cycle. Il y a lieu de convertir les données brutes (4 mV/hPa, 1,55 V/cm³) pour en déduire le travail. La méthode, basée sur le produit vectoriel, est décrite en annexe. Par exemple, on trouve

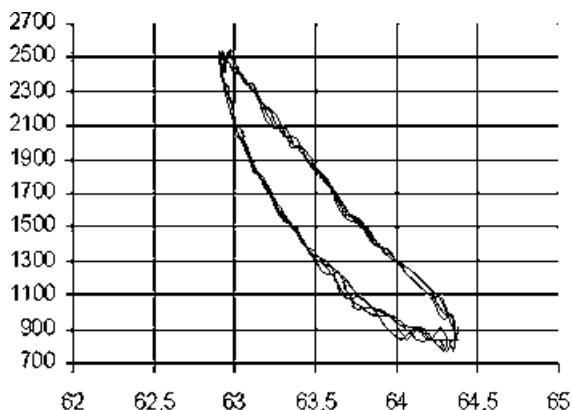


Figure 13 : Cycle (P,V) affiché avec un tableau ; l'origine des pressions (en Pa) n'est pas précisée.
Le volume (non modifié) est exprimé en cm^3 .

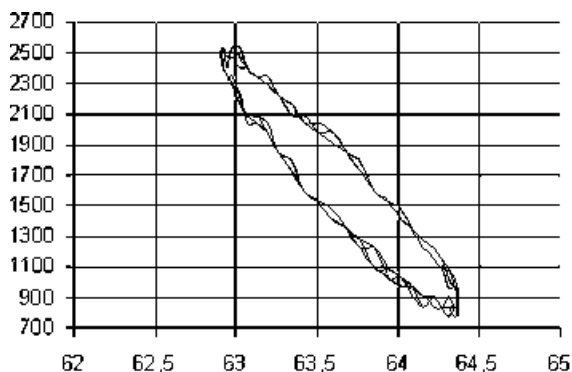


Figure 14 : Cycle (P,V) affiché avec un tableau ; l'origine des pressions (en Pa) n'est pas précisée.
Le volume (corrigé) est exprimé en cm^3 .

2,6 mJ⁽¹⁴⁾ pour une durée de cycle de 0,53 s, soit une puissance de 4,9 mW avec un pack d'eau à 50° comme source chaude⁽¹⁵⁾.

Il est difficile d'évaluer la chaleur fournie au moteur par la source chaude. Celle-ci se refroidit, indubitablement, mais une partie de la chaleur ainsi perdue n'est pas récupérée par le moteur. Il faudrait calorifier le pack d'eau chaude...

Le rendement du moteur idéal de CARNOT fonctionnant entre des sources à 20° et 50° est d'environ 9 %.

(14) Le résultat numérique obtenu est en fait négatif, puisque le travail est fourni.

(15) Rappelons que « la » température du gaz ne peut pas être définie, car elle n'est pas uniforme lors des transformations à cause, entre autres, du brassage de l'air lors de son transfert d'une source vers l'autre.

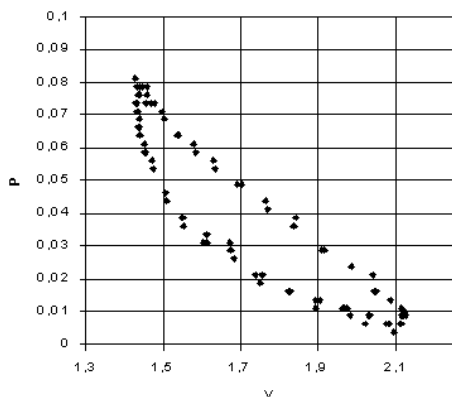


Figure 15 : Moteur à air froid.

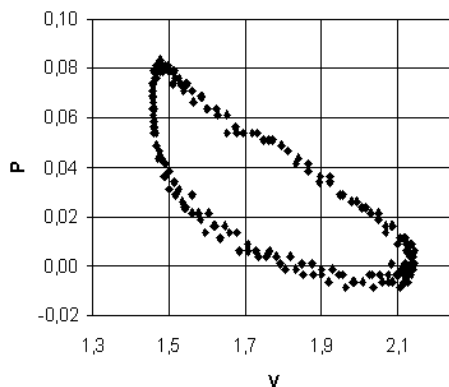


Figure 16 : Le même, freiné, reprenant de la vitesse.

Il est intéressant également de rechercher à l'aide du tableur les valeurs extrêmes du produit PV (penser à utiliser la pression totale, et non pas l'écart à la pression moyenne). La loi des gaz parfaits donne :

$$\frac{(P \cdot V)_{\max}}{(P \cdot V)_{\min}} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}$$

Si les transformations sont « complètes », $T_{\max} = T_{\text{source chaude}}$ et $T_{\min} = T_{\text{source froide}}$. On constate que pour $T_{\text{source chaude}} = 332 \text{ K}$ et $T_{\text{source froide}} = 293 \text{ K}$, on a :

$$\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = 1,0103 \quad \text{alors que} \quad \frac{T_{\text{source chaude}}}{T_{\text{source froide}}} = 1,102$$

L'écart entre les températures extrêmes dans la « fournaise » n'est que de trois degrés environ alors que l'écart entre les températures des sources est dix fois plus grand.

Pour le moteur à air froid freiné, tous calculs faits, on trouve $\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = 1,017$, ce qui confirme bien que le ralentissement du cycle permet de s'approcher plus près des températures des sources, puisque l'écart atteint désormais environ cinq degrés, six fois moins que l'écart entre les températures des sources.

5.6. En guise de conclusion (provisoire)

J'ai essayé de montrer que le moteur de Stirling était un outil très adapté à l'enseignement de la thermodynamique et une solution pas trop utopique lorsqu'on a besoin d'une motorisation régulière. Nous avons reçu le nôtre depuis peu de temps. Nous avons de nombreux projets, comme la mesure du couple moteur utile et de la puissance motrice (en élevant des masses marquées), la visualisation de la température à l'intérieur du cylindre par phosphorescence, utilisation des cristaux liquides, mesure de la vitesse des

ultrasons ou interférométrie, l'amélioration des caractéristiques du capteur de volume et du fonctionnement en réfrigérateur, la modélisation du cycle, le remplacement de l'air par de l'hélium, etc. Ces améliorations, si elles se concrétisent, seront progressivement disponibles sur le site du lycée : <http://www.ac-dijon.fr/etab/cotedor/eiffel>
Je serai, pour ma part, heureux de recevoir vos suggestions, remarques ou critiques à l'adresse suivante : alain.caillate@tiscali.fr

Je voudrais terminer par une anecdote. En début d'année scolaire, on m'avait prêté pour quelques jours un moteur Stirling réalisé en école d'ingénieurs. Je l'ai fait fonctionner devant mes étudiants (classe de PTSI) en m'excusant de ce que l'expérience présentée avait six mois d'avance sur le cours de thermodynamique.

Leur enthousiasme a été immédiat. Quelques semaines après, l'un d'eux s'était documenté ; un autre avait commencé à en construire un, puis deux, puis trois... J'ai vu ces étudiants, malgré la charge de travail qui leur incombait déjà, se plonger dans la lecture (un peu rébarbative, de prime abord !) de manuels de thermo, manipuler des différentielles, des équations nouvelles pour eux, essayer de comprendre... En fin d'année, l'un d'eux a présenté un TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) traitant du moteur Stirling !

Y a-t-il plus belle récompense pour un enseignant que de susciter enthousiasme et curiosité chez ses étudiants ?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GENEVOIS D. Le moteur Stirling. *Bull. Un. Phys.*, mars 2001, vol. 95, n° 832, p. 551-558.
- [2] PETITET F. Les cycles dithermes à l'épreuve du temps. *Bull. Un. Phys.*, mai 2000, vol. 94, n° 824 (1), p. 917-928.
- [3] Les olympiades de physique 1999 : Réalisation d'un ensemble moteur Stirling à piston libre + alternateur linéaire (résumé). *Bull. Un. Phys.*, mai 2000, vol. 94, n° 824 (1), p. 1037-1043.
- [4] MÉMIN R. Les moteurs Stirling (15 plans).
J2P Éditions - Bateau Modèle - BP 20 - 38540 HEYRIEUX
- [5] Carnot. *Encyclopedia Universalis*.

SUR LA TOILE

- [6] Théorie de Schmidt :
<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>
- [7] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/> (site incontournable).
- [8] <http://www.stirlingengine.com/>

- [9] <http://home.t-online.de/home/Wilhelm.Lutzer/>
- [10] <http://www.stirlingmotor.com/>
- [11] Site du lycée du CREUSOT :
<http://www.creusot.net/archives/idee/stirling/>
- [12] http://www.udppc.asso.fr/qr/qrphysique/qp0010_02.pdf
 contenant de nombreuses références.
- [13] <http://www.voilelec.com/pages/energie.php>



Alain CAILLATE

Professeur de sciences physiques en PTSI
 Lycée Gustave Eiffel
 Dijon (Côte d'Or)

Annexe 1

Calcul (très simpliste) du fonctionnement en réfrigérateur

Dans un premier temps le gaz est comprimé de 2 % de façon supposée adiabatique, avec $\gamma = 1,4$. Sa température s'élève alors relativement de $(0,4 / 1,4) \cdot 2\%$ soit environ $0,4 \cdot 2 \cdot 293 / 140$ (formule de Laplace avec les différentielles), ce qui donne environ deux degrés.

Globalement, la transformation sera quasi-isotherme, mais on la décompose ici en plusieurs étapes, dont la première est adiabatique q.s.r (elle dure environ 1/10 de seconde, les échanges de chaleur entre le gaz et les plaques n'ont pas encore eu le temps de se faire !).

Dans un deuxième temps, le gaz cède de la chaleur à l'extérieur puisqu'il est plus chaud que l'extérieur de deux degrés.

Si on estime à 10 % la quantité d'énergie due à la compression qui se retrouve ainsi cédée à l'extérieur (faible gradient thermique et durée aussi brève de la phase isochore), cela nous fait 0,01 Joule.

En effet le ΔV est de 1 cm^3 environ d'où $-P_{\text{ext}} \cdot \Delta V = 0,1 \text{ Joule}$.

Résumons-nous : l'extérieur reçoit 0,01 Joule. Mais l'extérieur, c'est déjà la plaque d'aluminium de 100 grammes qui sert de couvercle à la machine de Stirling. Avec une capacité calorifique de l'ordre de 0,4 Joule par Kelvin et par gramme, on atteint alors 0,25 millièmes de degré d'élévation de température de cette plaque!

Le « cycle » contient deux isochores et une détente du même type, pour le gaz, ce qui le ramène quasiment à l'état initial. Initialement, la détente et la compression sont presque confondues puisque les températures des sources diffèrent à peine. Par contre la compression chauffe peu à peu une plaque tandis que la détente refroidit peu à peu l'autre.

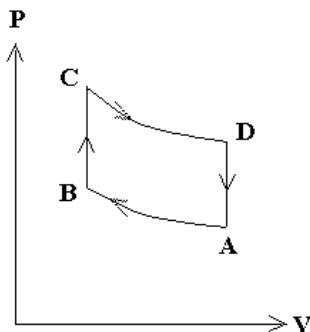
Si l'opération est répétée cent fois par minute, le premier dixième de degré d'échauffement est donc atteint au bout de quatre minutes. De même, sur l'autre plaque (le fond), on aura un abaissement de température de 0,1 degré en quatre minutes.

C'est ce qui est constaté expérimentalement.

Annexe 2

Produit vectoriel et surface du cycle

Reprenons la figure 1 :



Le produit vectoriel $\overrightarrow{OC} \wedge \overrightarrow{OD}$ a pour norme le double de la surface du triangle OCD. Sa projection sur le troisième axe du trièdre direct dont les deux premières directions sont celles de \overrightarrow{OV} et \overrightarrow{OP} vaut :

$$V_C \cdot P_D - V_D \cdot P_C$$

Elle est négative, tout comme $V_D \cdot P_A - V_A \cdot P_D$ qui représente de même la projection du produit vectoriel $\overrightarrow{OD} \wedge \overrightarrow{OA}$ sur ce troisième axe. Les deux projections suivantes sont positives et la somme :

$$(V_C \cdot P_D - V_D \cdot P_C) + (V_D \cdot P_A - V_A \cdot P_D) + (V_A \cdot P_B - V_B \cdot P_A) + (V_B \cdot P_C - V_C \cdot P_B)$$

n'est autre que le double de la surface algébrique du **quadrilatère** ABCD. L'orientation de l'espace est telle que cette somme est positive si l'on tourne dans le sens trigonométrique. Elle est donc négative, ici.

Pour avoir la surface du cycle, c'est-à-dire $W = - \oint_{\text{cycle}} \mathbf{P} \cdot d\mathbf{V}$, on se sert d'un maximum de points intermédiaires entre A, B, C, D. Remarquons que **dans le cas d'un cycle**, la position de l'origine n'a pas d'importance sur la valeur de la somme obtenue.

En effet, évaluons le résultat obtenu lorsque l'origine est prise en O' :

$$\sum_i \overrightarrow{O'M_i} \wedge \overrightarrow{O'M_{i+1}} = \sum_i \left[\overrightarrow{O'M_i} \wedge \left(\overrightarrow{O'M_i} \wedge \overrightarrow{M_i M_{i+1}} \right) \right] = \sum_i \left[\left(\overrightarrow{O'O} + \overrightarrow{OM_i} \right) \wedge \overrightarrow{M_i M_{i+1}} \right] =$$

donc :

$$\sum_i \overrightarrow{O'M_i} \wedge \overrightarrow{O'M_{i+1}} = \overrightarrow{O'O} \wedge \sum_i \overrightarrow{M_i M_{i+1}} + \sum_i \overrightarrow{OM_i} \wedge \overrightarrow{OM_{i+1}}$$

Comme $\overrightarrow{O'O} \wedge \sum_i \overrightarrow{M_i M_{i+1}} = \vec{0}$, puisque, sur un cycle, le dernier point est identique au premier, cela démontre bien la proposition.

Il en résulte que le calcul de la surface peut être effectué avec la surpression et non la pression totale, et sans bien connaître le volume minimum exact de l'air intérieur, ce qui est commode. On est, en fait, avec cette méthode de produit vectoriel, conduit à une intégrale par la méthode des trapèzes, mais la mise en application est très simple avec un tableur : on recopie la formule $=V1*P2-V2*P1$ sur toute la hauteur de la colonne des mesures correspondant à un cycle de mesures de V et P (rappelons que le dernier point doit correspondre exactement au premier pour que le cycle se referme bien ⁽¹⁶⁾) puis on somme et on divise par deux ! Voici un extrait du tableau correspondant :

Volume (brut)	Pression (brute)	Volume simulé	Surpression (Pa)	Pdt vectoriel
1,5116	0,09377	63,20	2344,25	– 8068,02
1,5466	0,08877	63,27	2219,25	– 8079,76
1,5866	0,08377	63,34	2094,25	– 170,68
1,6316	0,08377	63,43	2094,25	– 8105,61
1,6692	0,07877	63,51	1969,25	– 170,81
1,7042	0,07877	63,60	1969,25	– 8122,14
1,7542	0,07377	63,68	1844,25	– 4141,11
1,8117	0,07127	63,77	1781,75	– 12109,70
1,8692	0,06377	63,86	1594,25	– 4138,84
1,9292	0,06126	63,94	1531,50	– 4116,55
1,9917	0,05876	64,02	1469,00	– 8109,94

Les données brutes issues des capteurs sont dans les deux premières colonnes. La conversion en cm^3 et en Pa est dans les deux colonnes suivantes (il faut travailler en m^3 pour avoir le résultat en Joule). La colonne « produit vectoriel » contient les valeurs successives de l'expression $V_n \cdot P_{n+1} - V_{n+1} \cdot P_n$.

(16) Au besoin, on ajuste cela « à la main ».

Annexe 3

Modèle de lettre pour pouvoir se procurer le moteur (ça peut servir !)

Jacques THERMO

Dijon, den 14.04.2004

Einkaufsleiter

Lycée Stirling

15 avenue du Cycle

21000 DIJON

FRANCE

`jacques.thermo@ac-dijon.fr`

Sehr geehrter Herr Schmidt

Wir möchten für unser Gymnasium einen Stirlingmotor kaufen, den wir auf dem web www.stirlingmotor.com/motord.htm gefunden haben:

Modell 1076-F (GUE-2-F)

Fertigmodell Handwärme-Stirlingmotor, HWM

Aber, es ist unmöglich für unsere Buchhaltung, die Produkte mit Kreditkarte bei Ihnen in Deutschland zu bestellen. Deshalb möchten wir gerne wissen, ob Sie zuerst eine „Facture pro-format“ zu uns senden können; das heißt ein Dokument mit dem namen Ihrer Unternehmung, Ihrer Bankadresse und Kontonummer und dem Preis mit Versandkosten.

Dann werden wir bei Ihnen die Produkte bestellen und per Nachname zahlen.

Besten Grüßen.

Jacques THERMO

Suivi de la même, en anglais, des fois qu'on ne se comprenne pas bien...

Jacques THERMO

Dijon, den 14.04.2004

Einkaufsleiter

Lycée Stirling

15 avenue du Cycle

21000 DIJON

FRANCE

`jacques.thermo@ac-dijon.fr`

Dear Sir,

We would like to buy a Stirlingmotor for our high school. We have found something which answers exactly our needs on your web-site at the address: www.stirlingmotor.com/motord.htm

Modell 1076-F (GUE-2-F)

Fertigmodell Handwärme-Stirlingmotor, HWM

But it is impossible for our accounting to buy it with any credit card. So, we would like you to send us, if possible, what we call a "Facture pro-format", which is a document with the name of your company, the one of your bank, your bank number and the total price of this Stirlingmotor (with taxes, package and posting included).

Then, we will immediately order this product and pay it as soon as received.

Yours sincerely.

Jacques THERMO

Ce qui signifie :

Jacques THERMO

Responsable achats

Lycée Stirling

15 avenue du Cycle

21000 DIJON

jacques.thermo@ac-dijon.fr

Dijon, le 14 avril 2004

Monsieur,

Nous souhaitons acheter un moteur Stirling pour notre lycée. Nous avons trouvé quelque chose qui nous convient parfaitement, en visitant votre site web, à l'adresse :

www.stirlingmotor.com/motord.htm

***Moteur Stirling Modèle 1076-F,
assemblé, fonctionnant avec la chaleur de la main***

Cependant, il nous est techniquement impossible de vous régler par carte bancaire. Aussi, nous souhaiterions que vous nous fassiez parvenir une « Facture pro-format » c'est-à-dire un document spécifiant les noms de votre entreprise et de votre organisme bancaire, le numéro de votre compte bancaire et le montant total (taxes et frais d'envoi compris) de ce moteur.

Dès réception de ce document, nous vous passerons commande du matériel que nous paierons à la livraison.

Salutations distinguées.

Jacques THERMO