

C1. Cycle de Stirling

1 But de la manipulation

Étude du cycle thermodynamique de Stirling, relevés des cycles. Mesure du rendement d'un moteur à air chaud pour différents régimes de rotation. Étude des rendements d'une machine frigorifique puis d'une pompe à chaleur en fonction de la température.

2 Introduction et phénoménologie

La recherche de nouveaux moteurs est stimulée par le besoin actuel de machines moins polluantes et davantage performantes au point de vue du rendement.

À l'exception de sources d'énergie musculaire et des sources d'énergie électrique, tous les moteurs sont thermiques : le moteur à explosion, conçu par Beau de la Rochas en 1864 et réalisé en 1878 par Ott, ou encore le moteur à air chaud, inventé en 1816 par le pasteur écossais Stirling).

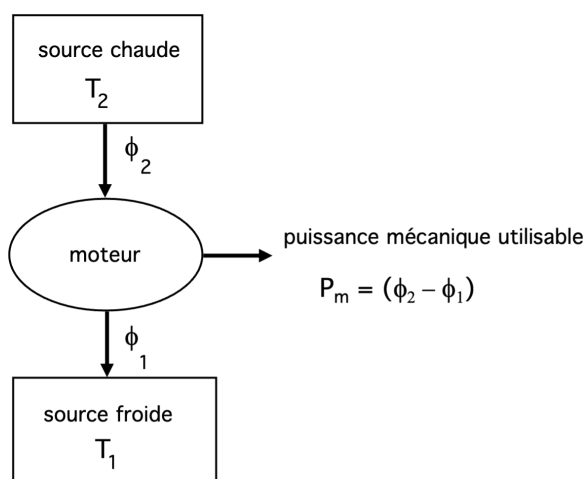


FIGURE 1 – Principe des moteurs thermiques.

Un moteur thermique est une machine thermique capable de convertir une partie $\phi_2 - \phi_1$ d'un flux de chaleur ϕ_2 [J/s] fourni par une source chaude à température T_2 , en puissance mécanique P_m (puissance motrice recueillie sur l'arbre de rotation). Le flux ϕ_1 est obligatoirement perdu par rejet dans une source froide à température T_1 (voir Fig.1).

Le moteur thermique fonctionne sur un cycle thermodynamique. Le cycle de Carnot est représenté dans le diagramme PV par deux isothermes et deux adiabatiques. Le cycle de Stirling est différent en ce sens qu'il est représenté par deux isothermes et deux isochores (voir Fig.2 et Fig.3).

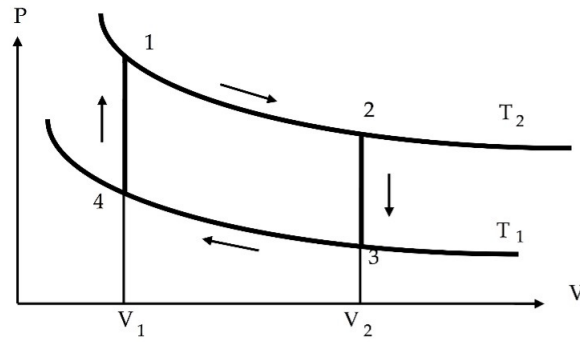


FIGURE 2 – Cycle de Stirling.

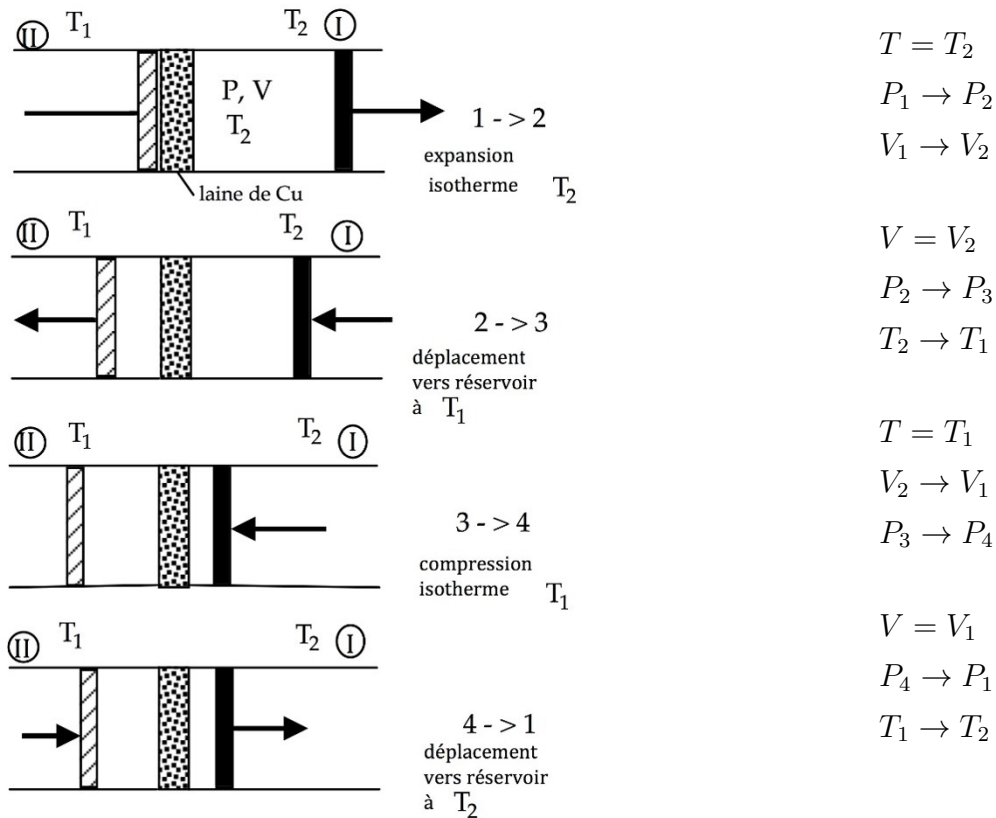


FIGURE 3 – $T_2 > T_1$ pour le cycle de Stirling.

La thermodynamique montre que le rendement ρ du moteur, défini par le quotient de la puissance motrice W par le flux de chaleur ϕ_2 fourni par la source chaude, est inférieur au rendement idéal d'une machine fonctionnant selon le cycle imaginé par Carnot en 1824 (consulter les cours usuels de thermodynamique).

$$\rho = \frac{P_m}{\phi_2} < 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

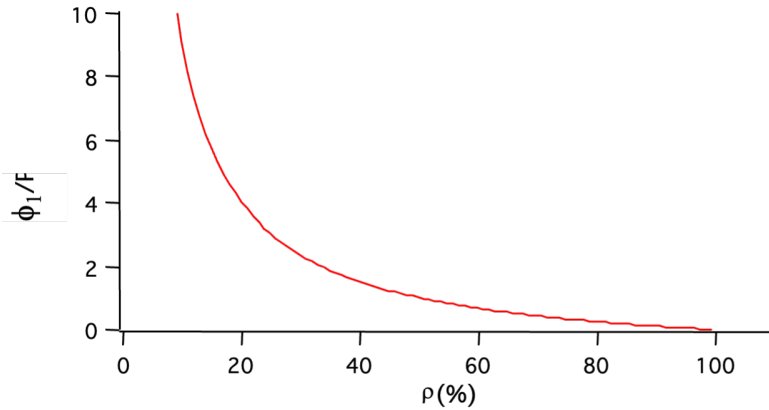


FIGURE 4 – Flux de chaleur à évacuer (en kW) en fonction du rendement.

Dans le cas d'un moteur à explosion, la chaleur perdue ϕ_1 est rejetée directement dans l'atmosphère par les gaz d'échappement : on dit que la machine fonctionne à cycle ouvert. Dans le cas d'une machine à cycle fermé (cas du moteur de Stirling), il faut évacuer ϕ_1 par l'intermédiaire d'un système de refroidissement. Le flux ϕ_1 rejeté augmente rapidement lorsque le rendement ρ diminue (voir Fig.4), d'où une raison supplémentaire pour augmenter ρ .

Quoique nécessitant un dispositif d'évacuation de la chaleur de taille moyenne, le moteur de Stirling présente au moins trois avantages sur le moteur à explosion. Il est silencieux, il travaille dans un rapport des températures $\frac{T_1}{T_2}$ plus petit et son rendement ρ est meilleur comparé au rendement thermodynamique maximal.

3 Montage expérimental

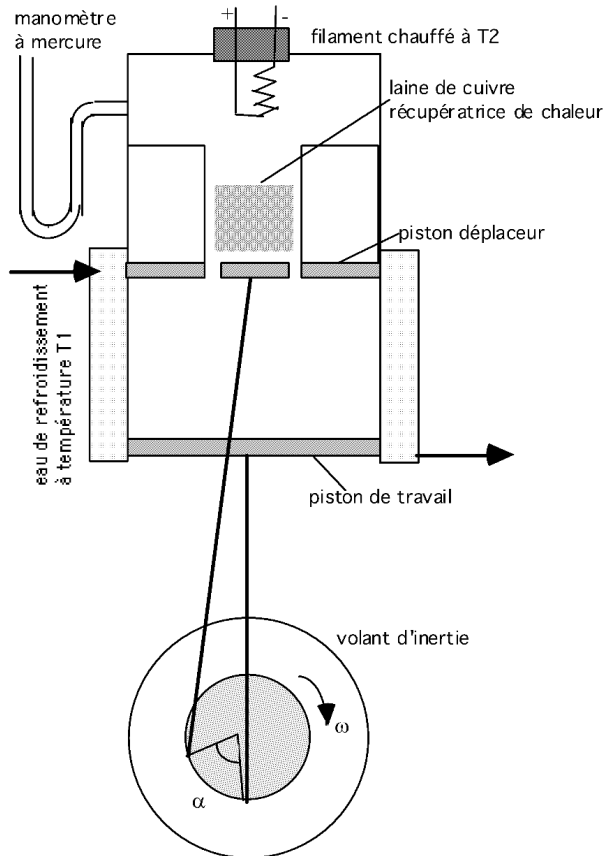


FIGURE 5 – Schéma du moteur de Stirling.

Version moteur à air chaud : La version de laboratoire (voir Fig.5) de la machine de Stirling opère sur un fluide (air) enfermé dans un cylindre muni de deux pistons dont les mouvements sont déphasés d'environ un quart de tour.

Un piston déplaceur, commandé par la rotation de l'arbre de la machine, se charge de mettre le fluide en contact alternativement avec la source chaude (filament métallique chauffé au rouge par un courant électrique) et avec la source froide (circuit de refroidissement à eau). Un piston dit "de travail" suit les variations de volume du fluide et communique son mouvement à l'arbre du moteur par l'intermédiaire d'une bielle. Durant la phase 4 de la compression isochore (volume constant), l'air se réchauffe plus vite au contact de la laine de cuivre qui a emmagasiné de la chaleur durant la phase 1 de détente isotherme, d'où une augmentation de la vitesse de succession des cycles. En fait, la laine de cuivre

aide à étendre la source chaude. Une image du montage est disponible en fin de document (Figure 8).

Machine frigorifique et pompe à chaleur :

Au lieu de fonctionner comme moteur à air chaud, la machine de Stirling peut tourner comme machine frigorifique ou pompe à chaleur si elle est entraînée par un moteur électrique induisant les sens respectifs de rotation I et II (voir Fig.6a).

En pareil cas, la partie supérieure du cylindre peut soit être refroidie, soit réchauffée. Le filament de chauffage est alors remplacé par un ensemble sonde de température et petit filament électrique de compensation thermique (voir Fig.6b).

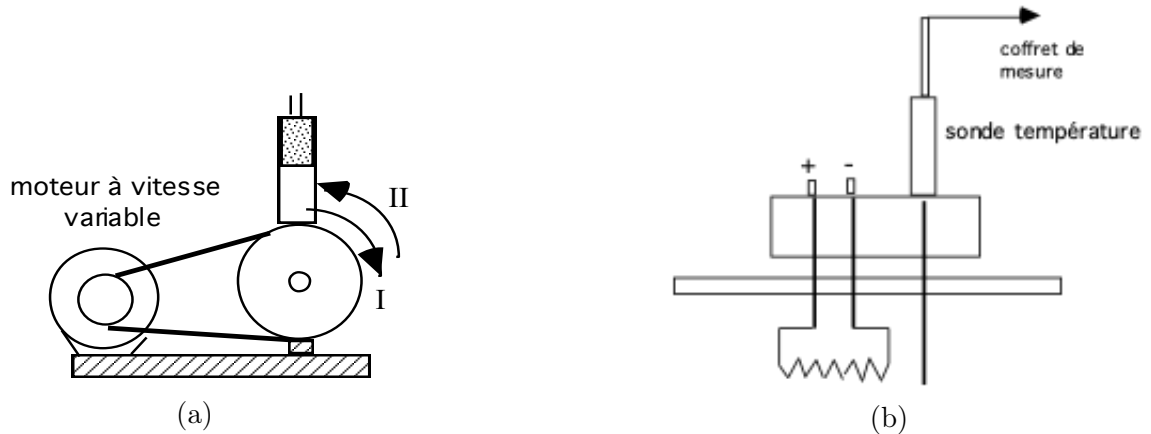


FIGURE 6 – a) Entraînement de la machine de Stirling par un moteur électrique de vitesse réglable. b) Ensemble sonde de température - filament électrique.

ATTENTION : Les ensembles amovibles fermant la partie supérieure du cylindre sont fragiles.

4 Grandeurs mesurables expérimentalement

Un débitmètre permet de mesurer la quantité d'eau qui, chaque minute, traverse le système de refroidissement. Deux sondes mesurent les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie du moteur. La hauteur de la partie inférieure de la bille définit le débit. Pour obtenir un débit en cm^3/min , se référer à une table de correspondance affichée sur place. Ce débit permet ensuite de déterminer le flux de chaleur ϕ_1 .

Le flux de chaleur ϕ_2 est simplement déterminé par la puissance électrique fournie au corps de chauffe. Dans le cas de la machine frigorifique, on règle le filament de sorte à avoir une température stable. Le flux de chaleur évacué par la machine de Stirling correspond alors à la chaleur qui est apportée par le filament. La puissance mécanique P_m débitée par le moteur à air chaud peut être mesurée par la méthode du freinage de son arbre de rotation (voir Fig.7a).

Le couple exercé par le moteur peut être ajusté en modifiant l'espacement entre le dispositif de freinage et le volant d'inertie. La rotation de l'arbre du moteur, animé de la vitesse ω , est mesurée avec un compte-tours. Le calcul (à montrer) de la puissance P_m disponible vaut

$$P_m = \omega \cdot F \cdot R \cdot \cos \alpha$$

Finalement, un petit miroir plan, mobile autour de deux axes, l'un horizontal et l'autre vertical, est relié mécaniquement au piston de travail et au manomètre à mercure. De la sorte, par renvoi d'un faisceau lumineux sur un écran fixe vertical, il permet la projection du diagramme PV sur un écran. Le diagramme peut donc être tracé sur une feuille de papier. L'étalonnage du diagramme PV obtenu, se fait en déterminant le volume minimal et maximal compris entre les deux pistons, puis en lisant deux valeurs de pression sur le manomètre. Une fois étalonné, il suffit de calculer l'aire du diagramme pour obtenir la puissance mécanique W fournie par la machine thermique. Ceci est plus facile en discrétisant le diagramme PV (voir Fig.7b).

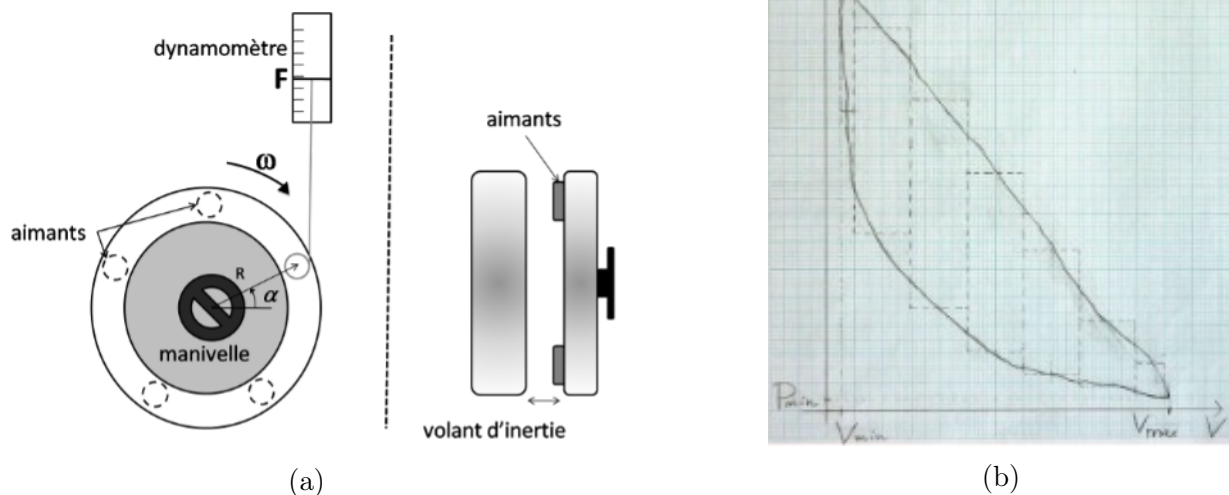


FIGURE 7 – a) Dispositif de freinage, vues de face et de côté. b) Diagramme PV expérimental avec discrétisation.

5 Travail demandé

Fonctionnement du moteur :

1. Calculer le rendement théorique du cycle de Stirling fonctionnant en mode moteur (voir diagramme PV en Fig.2). Proposer pour ce faire une évaluation de la température de la source chaude.
2. Comparer les valeurs de la puissance et du rendement mesurées par :
 - a) l'aire du cycle dans le diagramme PV
 - b) la méthode de freinage

- c) la différence des quantités de chaleur $\phi_2 - \phi_1 = P_m$ (voir Fig.1).
Discuter de la validité des mesures. On travaille avec un flux de chaleur fixé ϕ_2 .
3. Caractériser le moteur par un diagramme "couple-régime" (couple - vitesse de rotation ω) en faisant varier l'écartement du dispositif de freinage.
 4. Étudier le rendement du moteur à air chaud en fonction de la vitesse de rotation de son arbre ω . Comparer celui-ci au rendement thermodynamique maximal.

Fonctionnement de la machine frigorifique :

5. Étudier le rendement de la machine frigorifique en fonction de la vitesse du moteur d'entraînement. Rappelons que, dans ce cas, le rendement est fourni par le quotient du flux ϕ de chaleur évacué à la source froide, par la puissance développée par le moteur d'entraînement. Discuter les résultats.

ATTENTION : Remplacer le corps de chauffe avec un plus petit (qui a un thermocouple monté). Réguler la puissance fournie afin de maintenir la température à la température ambiante pour éviter l'échange de chaleur avec l'environnement. Ce filament plus petit ne peut pas supporter des courants élevés !

Travail complémentaire :

6. Effectuer une étude de votre choix sur la machine fonctionnant en pompe à chaleur. On remarquera que le cycle est identique en machine frigorifique et pompe à chaleur. Ce qui change c'est la source à considérer.
- Pistes de réflexion : Réfléchir aux paramètres modifiables (température des sources, puissance du moteur,...), aux méthodes (différence de flux, diagramme PV,...) et à l'intérêt des mesures.

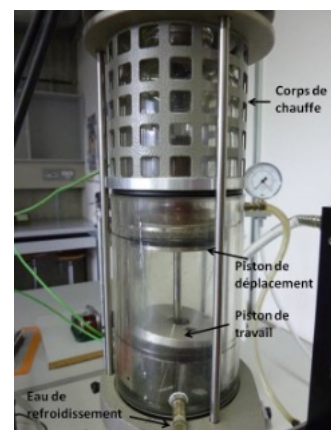
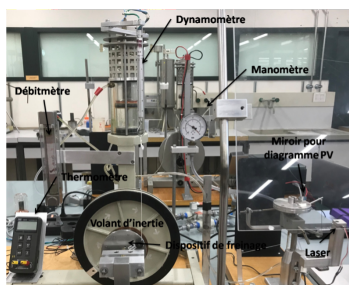


FIGURE 8 – Images du moteur de Stirling employé.