

C1. Cycle de Stirling

I. BUT DE LA MANIPULATION

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

II. INTRODUCTION ET PHENOMENOLOGIE

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

A l'exception de sources d'énergie musculaire et des sources d'énergie électrique, tous les moteurs sont thermiques: moteur à explosion (conçu par BEAU de la ROCHAS en 1864 et réalisé en 1878 par OTT), moteur à air chaud (inventé en 1816 par le pasteur écossais STIRLING), etc.

Un moteur thermique est une machine thermique capable de convertir une partie $\phi_2 - \phi_1$, d'un flux de chaleur ϕ_2 (joules/seconde) fournie par une source chaude à température T_2 , en puissance mécanique W (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 .

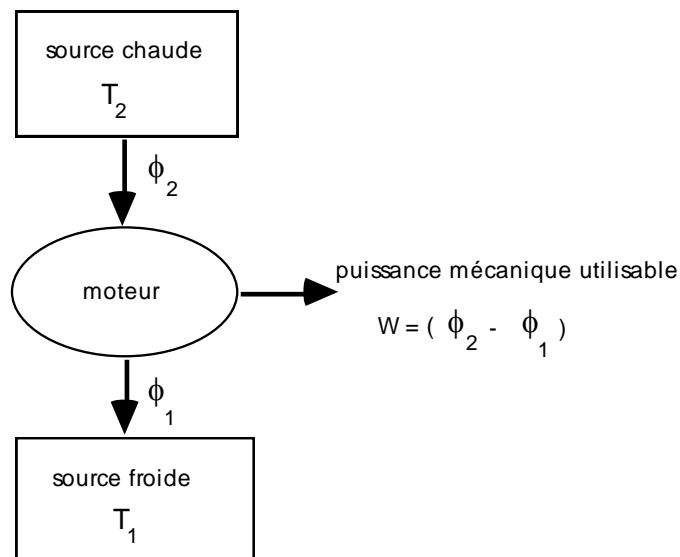
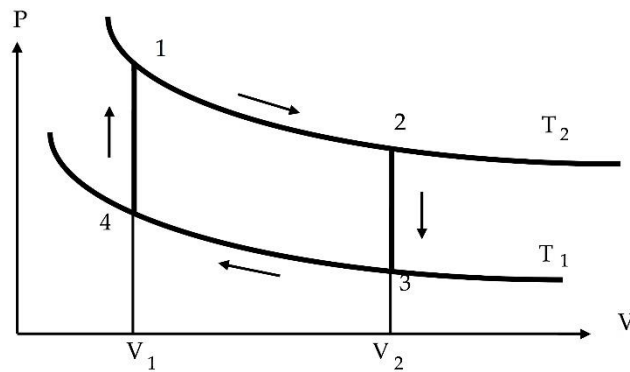
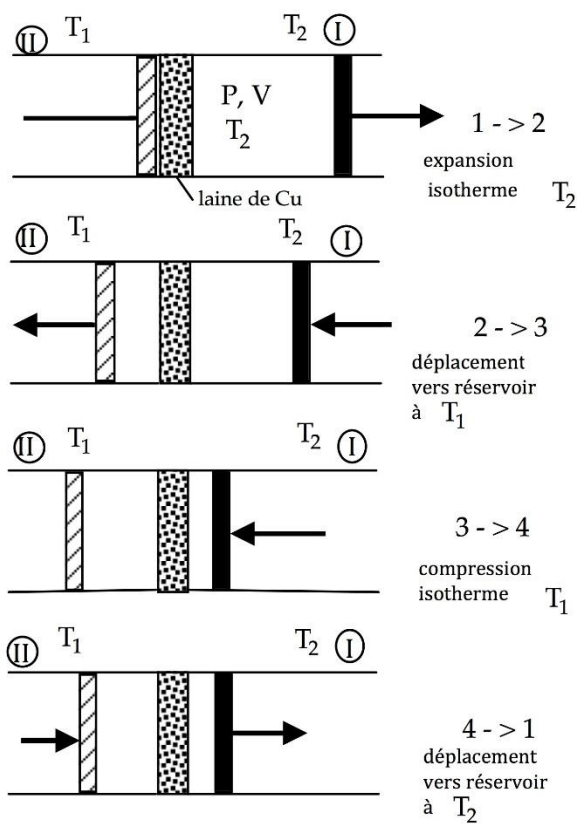


Fig. 1: Principe des moteurs thermiques

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

Cycle de Stirling:

$$T_2 > T_1$$



$$\begin{aligned} T &= T_2 \\ P_1 &\rightarrow P_2 \\ V_1 &\rightarrow V_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= V_2 \\ P_2 &\rightarrow P_3 \\ T_2 &\rightarrow T_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= T_1 \\ V_2 &\rightarrow V_1 \\ P_3 &\rightarrow P_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= V_1 \\ P_4 &\rightarrow P_1 \\ T_1 &\rightarrow T_2 \end{aligned}$$

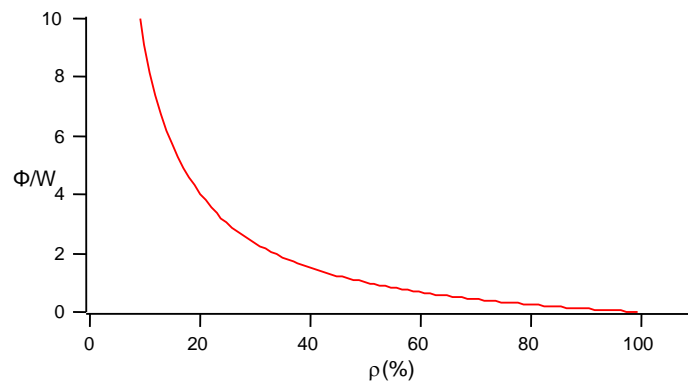
Fig. 2: Cycle de Stirling.

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):

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

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

(fig. 3), d'où une raison Fig. 3: Flux de chaleur à évacuer (en kW caloriques/kW supplémentaires) pour augmenter ρ . mécaniques) en fonction du rendement.



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.

III. MONTAGE EXPERIMENTAL

Version moteur à air chaud.

La version de laboratoire (fig.4) 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.

Un image du montage est disponible en fin de document, figure 9.

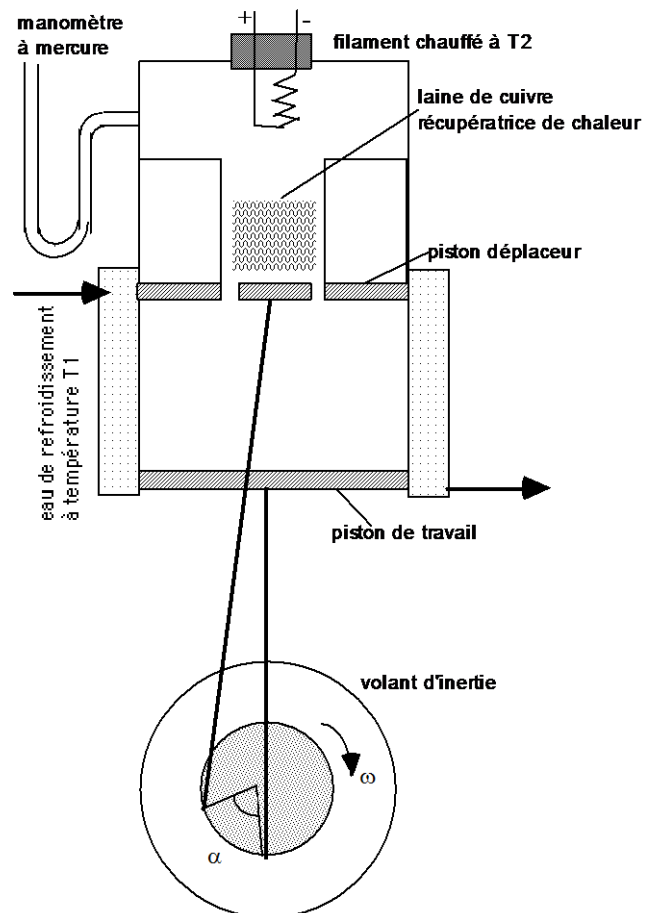


Fig. 4: Schéma du moteur de Stirling

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 comme pompe à chaleur si elle est entraînée par un moteur électrique induisant les sens respectifs de rotation I et II (voir fig. 5).

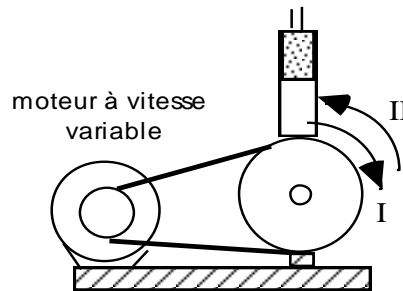


Fig. 5: Entraînement de la machine de Stirling par un moteur électrique de vitesse réglable

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.6).

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

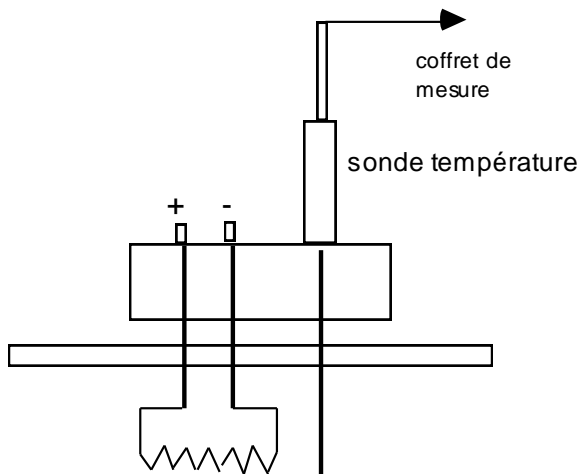


Fig. 6: Ensemble sonde de température - filament électrique

Grandeurs mesurables expérimentalement

Un débitmètre permet de mesurer la quantité d'eau qui chaque minute traverse le système de refroidissement. Deux sondes de température 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 W débitée par le moteur à air chaud peut être mesurée par la méthode du freinage de son arbre de rotation (voir fig.7). Par serrage convenable du poulet et réglage de la position de la masse coulissante, on s'assure de l'horizontalité de la tige support de la masse durant la rotation de l'arbre du moteur animé de la vitesse ω , mesurée avec un compte-tours. Le calcul (à montrer) de la puissance W disponible vaut

$$W = \omega \cdot m \cdot g \cdot d$$

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 la pression minimale et maximale 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. 8).

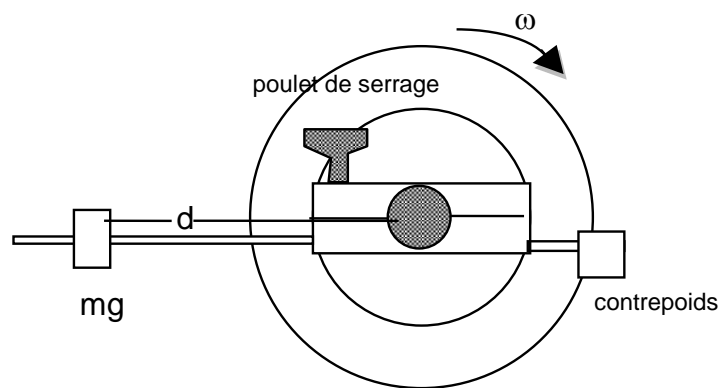


Fig. 7: Méthode de freinage pour déterminer la puissance moteur

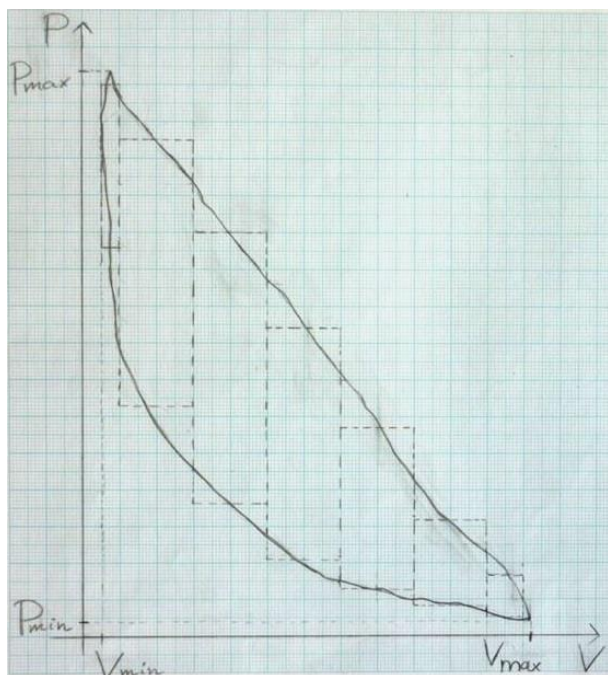


Fig. 8: Diagramme PV expérimental, avec discrétisation

IV. TRAVAIL DEMANDE

- 1) Calculer le rendement théorique du cycle de Stirling fonctionnant en mode moteur (cf. diagramme PV à la fig.2)
- 2) Comparer les valeurs de la puissance mesuré par
 - a) l'aire du cycle dans le diagramme PV
 - b) la méthode de freinage,
 - c) la différence des quantités de chaleur $\phi_2 - \phi_1 = W$ (fig. 1).
- 3) Etudier 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. Calculer l'énergie dissipée à chaque cycle. Discuter les résultats.
- 4) Caractériser le moteur par un diagramme "couple-régime" (couple - vitesse de rotation ω).
- 5) Etudier 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 !
- 6) Effectuer une étude de votre choix sur la machine fonctionnant en pompe à chaleur.



Fig. 9: Images du moteur de Stirling employé