

CYCLES THERMODYNAMIQUES, MOTEUR DE STIRLING

1. But:

Dans cette expérience on propose de faire fonctionner un moteur de Stirling, d'en déterminer le rendement et d'établir un bilan pour les échanges d'énergie en jeu.

De plus, on fera fonctionner la machine comme machine frigorifique et comme pompe à chaleur.

2. Référence:

1. M. W. Zemansky, Heat and Thermodynamics, 230 ZEM

2. Ch. Kittel, H. Kroemer, Thermal Physics, 230 KIT

Soyez prudent avec les différentes manipulations, c'est un équipement très susceptible. C'est uniquement avec le préparateur que vous allez démarrer l'expérience. Lorsque vous serez prêt à utiliser le corps de chauffe, appelez le préparateur pour qu'il vienne l'installer et s'assurer que tout est en ordre, la casse est très vite arrivée sans certains contrôles rigoureux. Merci.

Lors du remplissage du réservoir d'eau et lors du fonctionnement du moteur de Stirling, **on ne quitte pas sa place de labo**, aucun prétexte ne sera accepté, un dégât est très vite arrivé.

3. Introduction:

Le moteur de Stirling fonctionne selon un principe semblable à d'autres machines thermiques. L'élément essentiel d'un moteur thermique est constitué par une quantité fixe d'un gaz de travail (appelé également fluide ou système) qu'on fait opérer en cycle: on lui fait subir un certain nombre de transformations telles que la courbe (V(t),p(t)) (volume et pression du gaz en fonction du temps) se referme sur elle-même (voir par ex. la figure 1a). La variation de l'énergie interne (δU) étant nulle au cours d'un cycle, on a (en intégrant le 1er principe):

$$\delta U = 0 = \delta Q + \delta W$$

(δQ et δW étant respectivement la somme totale de chaleur et de travail échangée au cours du cycle.)

On sait d'après le deuxième principe de la thermodynamique qu'une telle machine doit nécessairement fonctionner entre deux réservoirs de chaleur: sur une certaine partie du cycle, le gaz de travail est mis en contact avec un réservoir chaud dont il reçoit une quantité Q_1 de chaleur et sur une autre partie avec un réservoir froid vers lequel il en rejette une quantité Q_2 . La différence δQ est égale au travail δW que le gaz échange avec l'extérieur:

$$Q_1 - Q_2 = dW$$

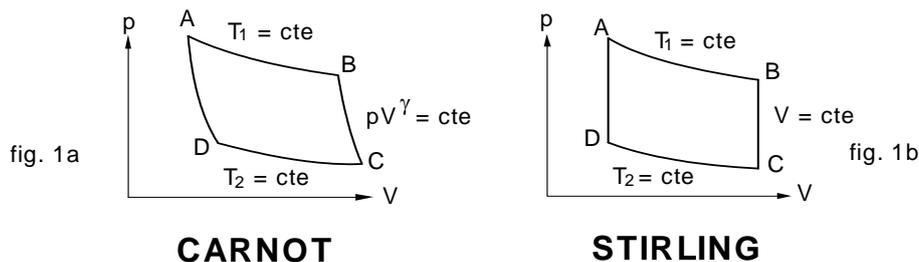
On définit le rendement (η) d'une machine thermique par le rapport:

$$\eta = \delta W / Q_1$$

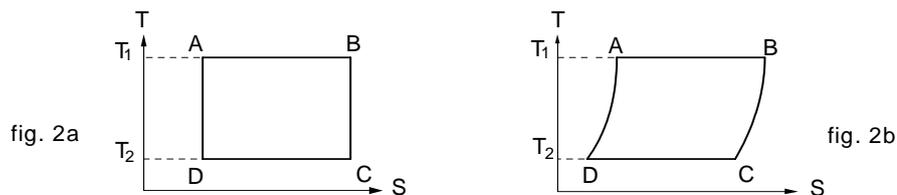
ou:
$$\eta = 1 - Q_2 / Q_1$$

3.1 Cycles de Carnot et de Stirling:

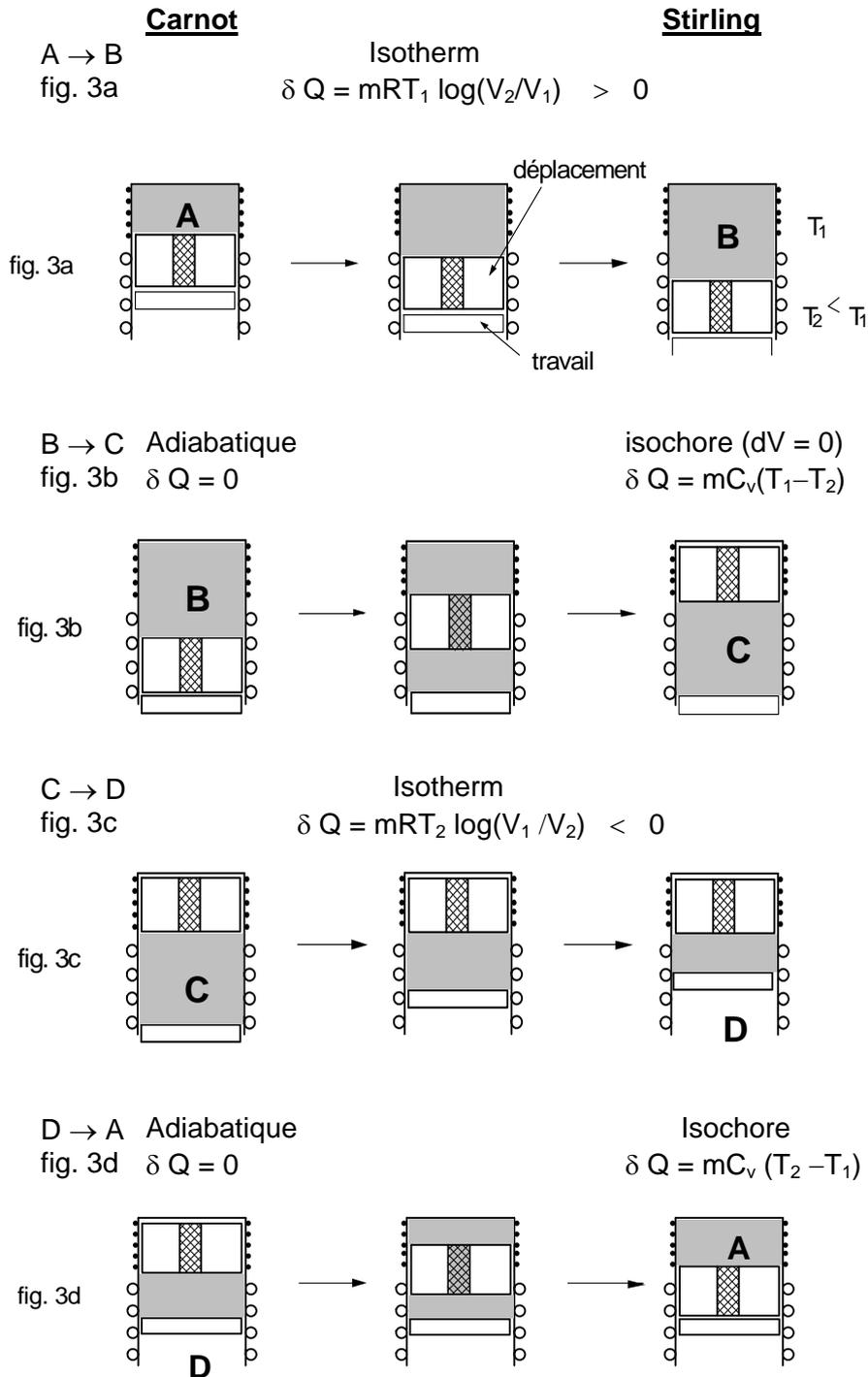
Nous allons traiter en parallèle les différentes caractéristiques des cycles de Carnot et de Stirling:



On peut représenter ces cycles également dans des diagrammes (T,S):



Voici une table décrivant les différentes portions de chaque cycle et montrant les quantités de chaleur que reçoit le système à chaque portion (les figures indiquées concernent le cycle de Stirling):



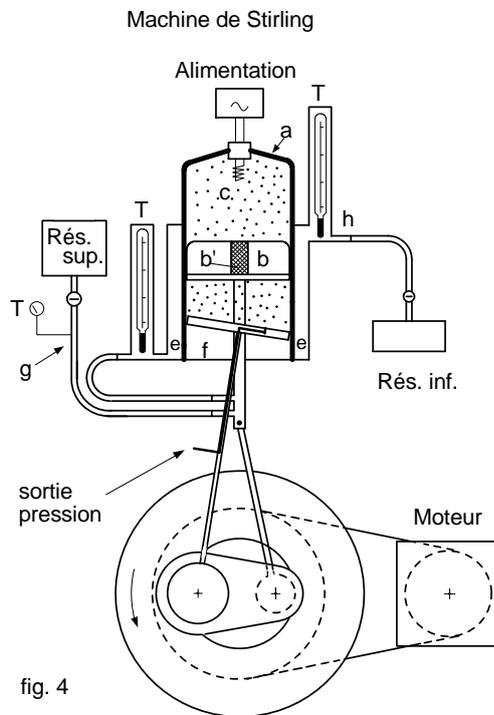
On peut montrer que le rendement théorique pour le cycle de Stirling (tout comme pour celui de Carnot ou tout autre cycle réversible) vaut:

$$\eta = 1 - T_2 / T_1$$

Les détails techniques du moteur de Stirling seront décrits dans la partie 4.1 (description de l'appareil).

4. Manipulations:

4.1 Description de l'appareil:



L'appareil de démonstration actuellement utilisé est constitué d'un jeu de bielles et d'un cylindre transparent (a). Ce dernier est virtuellement divisé en deux parties par le piston de déplacement (b). Dans la partie supérieure le gaz est en contact avec un filament chauffant (c) jouant le rôle de réservoir chaud. La quantité de chaleur apportée au système par unité de temps est déterminée par la mesure de la tension U aux bornes du filament et du courant I qui le traverse:

$$P_{\text{chauffage}} = U I$$

Lors de l'utilisation de la machine en pompe à chaleur ou en frigorifique, le filament est remplacé par une éprouvette contenant un échantillon à chauffer ou à refroidir (eau, gallium). La paroi inférieure du cylindre (e) est doublée pour permettre le passage d'eau de "refroidissement". Cette eau stabilise également la température de la partie inférieure du piston de déplacement (f). La mesure de la température de l'eau à l'entrée du piston (g) et à la sortie de la chambre (h) combinée avec la mesure du débit D permet de déterminer la quantité de chaleur échangée avec le gaz par unité de temps (C : chaleur spécifique de l'eau):

$$P_{\text{évacuation}} = D C (T_1 - T_2)$$

Le volume enfermé par le piston de travail est relié à une jauge mesurant la pression du gaz à tout instant. Quant au piston, il est relié à un capteur de déplacement donnant une tension proportionnelle à sa position, donc au volume. En branchant ces deux grandeurs sur les canaux Y et X d'un oscilloscope, on peut obtenir une image du cycle p-V. Il suffit alors de mesurer l'aire du cycle (impression "hard copy" de l'oscilloscope), de le convertir en unités de puissance pour obtenir la puissance P_{Tot} fournie par le gaz.

Le piston de déplacement possède une ouverture au centre permettant le passage (déplacement) du gaz. Ce trou est rempli de laine de cuivre (b') jouant le rôle de régénérateur: En passant du réservoir chaud au réservoir froid (B → C), le gaz cède une certaine quantité de chaleur au cuivre qu'il reprend lors du passage en sens inverse (D → A).

Pour calculer le rendement du moteur, on lui soutire du travail à l'aide d'un frein de Foucault. Le jeu de bielles est relié à un volant permettant d'emmagasiner l'énergie rejetée lors de la dilatation du gaz dans le réservoir chaud et de la restituer en partie lors de la compression dans la partie froide. On freine le moteur en faisant circuler du courant dans les bobinages de l'électroaimant. L'indication du dynamomètre (gradué en kilogrammes) sera proportionnelle à la force de freinage:

$$P_{\text{utile}} = 2 \pi r n m g$$

r = rayon de l'axe; n = nombre de tours par seconde)

4.2 Etablissement du bilan d'énergie et calcul du rendement:

Commencer par faire démarrer le moteur **en présence du préparateur uniquement:**

- ouvrir les robinets permettant le passage de l'eau de "refroidissement" et mesurer le débit, bien remettre le tuyau en place dans l'entonnoir d'écoulement.
- s'assurer que le piston de déplacement ne touche pas le filament;
- faire passer un courant de moins de 15 A (après avoir branché les fils);
- lancer le volant dans le sens des aiguilles d'une montre; recommencer jusqu'à ce que le moteur ne s'arrête plus;
- **ne jamais laisser le filament rouge sous tension et le moteur à l'arrêt, la cloche en verre se fissurera et rendra l'appareil inutilisable.**
- **attendre** que le moteur ait atteint une vitesse entre 250 et 350 t/min.

Mesures à effectuer:

- relever les températures de l'eau, (via le thermomètre digital connecté au PC), ainsi que celle du "réservoir" chaud, la fréquence, le courant et la tension d'alimentation du filament et faire une impression du cycle;
- freiner légèrement le moteur avec le frein de Foucault ($\delta m = 100g$), attendre un instant, remesurer le débit puis refaire les mêmes mesures qu'à vide.
- répéter cette mesure pour au moins deux autres valeurs de la force de frottement (jusqu'à 1 kg si c'est possible mais le moteur de Stirling ne doit jamais être à l'arrêt, risque de sérieux dommages !)
- répéter éventuellement ces quatre mesures pour quelques autres valeurs de la puissance d'alimentation.

Il ne reste alors plus qu'à effectuer le calcul du bilan énergétique et du rendement pour chaque mesure. La puissance associée au cycle se calcule de la manière suivante:

$$P_{\text{cycle}} = n W_{\text{réf}} m_{\text{cycle}} / m_{\text{réf}}$$

avec: m_{cycle} : masse du cycle découpé de l'impression (peut être aussi fait par pixellisation)
 $m_{\text{réf}}$: masse d'une partie de l'impression (par ex.: 3x3 cm²)
 $W_{\text{réf}}$: travail correspondant à cette surface

Comparer les rendements obtenus aux rendements théoriques. Tenir compte du fait que la température dans la chambre chaude est un peu plus élevée que celle lue à l'extérieur.

Remarques et questions:

- s'assurer régulièrement que le tuyau d'écoulement est bien en place dans le cône du siphon. Remplir le réservoir avec de l'eau à 20°C environ (laisser l'eau se mettre en température pendant 1h env.).
- Au cas où le moteur ne démarrerait pas, on peut remplacer la main du manipulateur par le moteur électrique auxiliaire qu'on couple au volant du moteur de Stirling pendant quelques minutes.
- A priori, on s'attendrait à ce que $P_{\text{utile}} = P_{\text{cycle}}$.
Pourquoi n'est-ce pas le cas?
- Le bilan ne jouera pas; en général, on a:

$$P_{\text{chauffage}} > P_{\text{évacuation}} + P_{\text{cycle}}$$

Où passe la différence ?

4.3 Détermination de la chaleur latente de l'eau et du gallium:

Remplir l'éprouvette de 1ml d'eau déminéralisée, s'assurer que l'extrémité du thermocouple ne touche pas la paroi de l'éprouvette, ne rien changer pour l'éprouvette de gallium qui comporte 3g de matière (toxique et irritant !).

Manipulations à effectuer:

- Dévisser le support du filament chauffant, **fait par le préparateur uniquement** (être très prudent avec le filament, ne pas le toucher et le ranger avec la protection mise dessus) et le remplacer par le support des éprouvettes. Enfoncer jusqu'en butée l'une des deux éprouvettes et serrer le collier.
- Relier le moteur électrique au volant du moteur par la courroie.
- S'assurer que l'eau de "refroidissement" circule.
- Brancher le thermomètre digital (câble liaison RS232 et alimentation 9V)
- Faire tourner la machine en enclenchant le moteur auxiliaire. **Pour refroidir l'éprouvette, quel sera le sens de rotation?**
- Observer la variation de température en fonction du temps, via le graphique de température affiché sur le PC. **Expliquer le comportement bizarre lorsqu'on passe de l'état solide à l'état liquide.**
- Inverser le sens de rotation pour utiliser la machine en pompe à chaleur. Faire tourner aussi lentement que possible.
- Passer au maximum de la vitesse de rotation (env. 16V maxi) et attendre d'obtenir la température "de saturation".
Pourquoi ne dépasse-t-on pas 100°C avec l'eau?

Calculs:

- Calculer la vitesse de réchauffement en mesurant la pente de la courbe T(t) immédiatement avant et après le palier de liquéfaction.
- Connaissant les valeurs de la chaleur spécifique pour l'état solide et liquide (C), ainsi que la masse m de la substance, calculer la puissance de réchauffement ($P_{\text{réch}}$) de la substance en question:

$$P_{\text{ré ch}} = Cm \left(\frac{dT}{dt} \right)_{T_{\text{fus}}}$$

Pourquoi est-elle plus grande en dessous du palier?

- Mesurer la durée δt du palier et calculer la quantité de chaleur Q_f nécessaire pour liquéfier la substance. En déduire la chaleur latente de fusion L_f :

$$L_f m = Q_f = P_{\text{ré ch}} \delta t$$

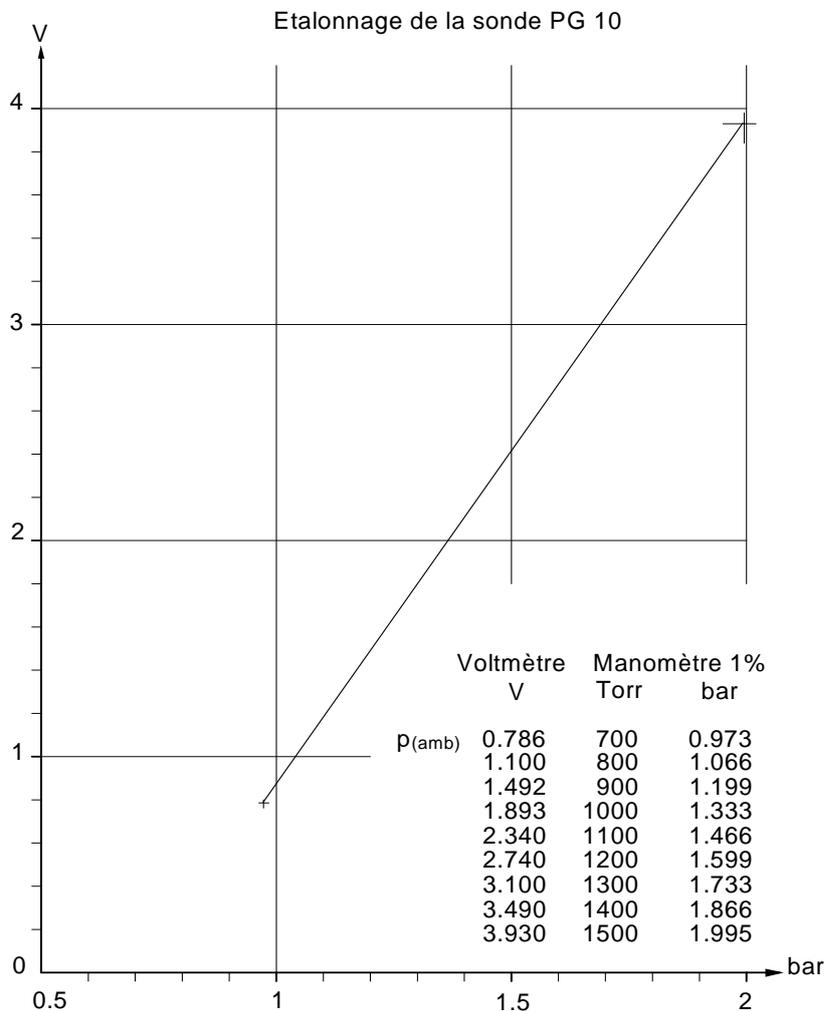


fig. 5

5. Matériel à disposition:

- ❑ Moteur de Stirling avec sondes de pression, déplacement et température
- ❑ Boîtier d'amplification des signaux de pression et déplacement.
- ❑ Thermomètre digital avec port série (pression de "hold et on" pour maintenir la mesure en continu sinon arrêt après 20 min.)
- ❑ Oscilloscope
- ❑ PC pour l'acquisition des données en température
- ❑ Moteur à courant continu
- ❑ Echantillons de Gallium (toxique-irritant) et eau
- ❑ Filament de chauffage (monté, ajusté et démonté par le préparateur!)
- ❑ Alimentation pour le chauffage du filament (12V-16A maxi.)
- ❑ Alimentation pour le moteur d'entraînement à CC.
- ❑ Balance précise
- ❑ Seringue pour doser le volume d'eau

Version 16.10.1986 ls/ls
Mise à jour 20.10.1986 /aj
Mise à jour oct. 2000
Mise en page juillet 2003 lw
Mise à jour nov. 2006 lw
Mise à jour août 2007 lw