

Compte rendu de TP Moteur Stirling

Baptiste Fanget - Léo Pezard
24/04/2025



Table des matières

| | | |
|----------|------------------------------------|----------|
| 1 | Introduction | 2 |
| 1.1 | Contexte et objectif | 2 |
| 1.2 | Concepts théoriques clés | 2 |
| 1.3 | Dispositif expérimental | 2 |
| 1.4 | Travail préparatoire | 3 |
| 2 | Expériences | 6 |
| 3 | Conclusion | 6 |

1 Introduction

1.1 Contexte et objectif

L'objectif de ce TP est d'étudier le **cycle thermodynamique de Stirling**, en mettant en évidence ses différentes configurations :

- moteur thermique à combustion externe,
- pompe à chaleur,
- machine frigorifique.

Le banc d'essai permet de visualiser les courbes $P = f(V, T)$, de tracer le **diagramme de Clapeyron** et de déterminer le **rendement des cycles** dans ces différents modes. Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'analyse des systèmes thermodynamiques réels et de l'exploitation de leurs performances énergétiques.

1.2 Concepts théoriques clés

Ce TP mobilise plusieurs notions fondamentales de thermodynamique :

- **Cycle de Carnot** : cycle théorique idéal constitué de deux isothermes et deux adiabatiques, au rendement maximal $\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.
- **Cycle de Stirling** : composé de deux isothermes et deux isochores, il peut approcher le rendement de Carnot si le régénérateur est parfait.
- **Machine thermique** : appareil recevant de la chaleur d'une source chaude pour produire du travail, avec rejet de chaleur vers une source froide.
- **Pompe à chaleur / Machine frigorifique** : fonctionnement inverse d'une machine thermique, avec absorption de chaleur d'une source froide en recevant du travail, pour chauffer une source chaude (pompe à chaleur) ou refroidir (frigo).
- **Rendement / Coefficient de performance (COP)** : indicateurs de performance énergétique.

1.3 Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé est un **moteur Stirling** simulé, composé (voir image en Figure 1):

- d'un **cylindre en verre** résistant à haute température,

- de **deux pistons** :
 - un **piston de refoulement** (en haut), contenant de la laine de cuivre pour améliorer le rendement,
 - un **piston de travail** (en bas), assurant la production de travail mécanique,
- d'un système de **circulation d'eau** entre deux cylindres (source chaude ou froide selon le mode de fonctionnement),
- d'un **volant d'inertie** qui assure une rotation régulière,
- de **capteurs** (pression et déplacement) connectés à un logiciel d'acquisition (Cassy-Lab2) permettant le tracé du diagramme $P - V$.

La chaleur est fournie par une résistance chauffante dans le mode moteur thermique, ou extraite par circulation d'eau dans les modes frigorifique et pompe à chaleur. Le mouvement des pistons, déphasés de $\pi/2$, permet le passage du gaz entre les zones chaude et froide, assurant ainsi les différentes phases du cycle de Stirling.

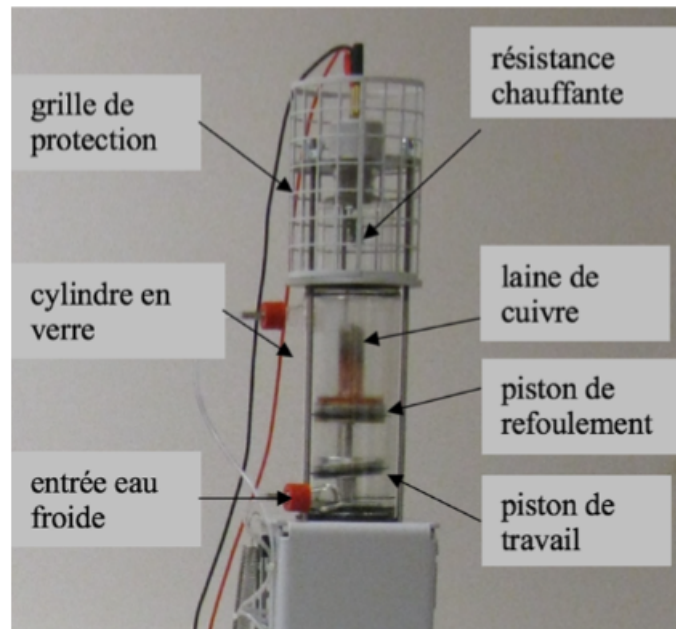


Figure 1: Composants du dispositif expérimental

1.4 Travail préparatoire

1. Volume et expressions thermodynamiques du cycle

- Le volume total du gaz est donné par :

$$V = S \cdot s_{B1} + V_0$$

où :

- S est la section du piston de travail,
- s_{B1} est le déplacement du piston,

– V_0 est le volume mort (volume minimal).

À partir du diagramme (figure 5), les transformations sont :

- **1 → 2** : compression isotherme à T_2

$$W_{12} = -nRT_2 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right), \quad Q_{12} = W_{12}$$

- **2 → 3** : chauffage isochore

$$W_{23} = 0, \quad Q_{23} = nC_V(T_1 - T_2)$$

- **3 → 4** : détente isotherme à T_1

$$W_{34} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right), \quad Q_{34} = W_{34}$$

- **4 → 1** : refroidissement isochore

$$W_{41} = 0, \quad Q_{41} = nC_V(T_2 - T_1)$$

Bilan sur le cycle :

$$W_{\text{cycle}} = W_{12} + W_{34}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{\text{entrant}}} = \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{34} + Q_{23}}$$

2. Cas avec régénérateur idéal

Si la chaleur isochore est entièrement récupérée et restituée par un régénérateur :

$$Q_{23} + Q_{41} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{entrant}} = Q_{34}$$

Donc :

$$\eta = \frac{W_{12} + W_{34}}{Q_{34}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

→ Ce rendement correspond au **rendement de Carnot**.

Conclusion : un Stirling avec régénérateur idéal atteint le rendement maximal théorique.

3. Section du piston et expression de V

Diamètre intérieur du cylindre : $D = 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,06)^2}{4} \approx 2,827 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Donc :

$$V(s_{B1}) = S \cdot s_{B1} + V_0$$

(à rentrer dans CassyLab2)

4. Vérification dimensionnelle : pV

$$[p] = \text{Pa} = \frac{N}{m^2}, \quad [V] = m^3 \Rightarrow [pV] = \frac{N}{m^2} \cdot m^3 = Nm$$

$\rightarrow pV$ a bien les dimensions d'un **travail**.

5. Travail fourni par un tour

Le logiciel donne W en $\text{hPa} \cdot \text{cm}^3$.

Conversion :

$$\begin{aligned} 1 \text{ hPa} &= 100 \text{ Pa}, & 1 \text{ cm}^3 &= 10^{-6} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ hPa} \cdot \text{cm}^3 &= 100 \times 10^{-6} = 10^{-4} \text{ J} = 0,0001 \text{ Nm} \end{aligned}$$

6. Puissance fournie

Si le travail par cycle est W , et que le moteur tourne à f tours/sec :

$$P = W \cdot f$$

7. Bilan énergétique par cycle

- Q_1 : chaleur absorbée à T_1
- Q_2 : chaleur rejetée à T_2
- Q_r : chaleur échangée avec régénérateur
- W : travail utile récupéré

$$W = Q_1 + Q_2 + Q_r$$

8. Rendement moteur thermique

Sans régénérateur :

$$\eta = \frac{W_{34} + W_{12}}{Q_{34} + Q_{23}} < 1$$

Avec régénérateur :

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta_{\text{Carnot}}$$

9. Fonctionnement pompe à chaleur / machine frigorifique

- **Machine frigorifique :**
 - objectif : absorber Q_{froid} , fournir un travail W
 - $\text{COP}_{\text{frigo}} = \frac{Q_{\text{froid}}}{W}$
- **Pompe à chaleur :**
 - objectif : délivrer Q_{chaud}
 - $\text{COP}_{\text{PAC}} = \frac{Q_{\text{chaud}}}{W}$

La chaleur est échangée par l'air via la laine de cuivre. En inversant le sens du moteur : - sens horaire : machine frigorifique, - sens trigonométrique : pompe à chaleur.

La puissance mécanique est :

$$P = W \cdot f$$

Pour mesurer la puissance « froide » : utiliser un **thermocouple** pour mesurer le débit thermique extrait par l'air dans la partie froide.

10. Utilisations actuelles du moteur Stirling

- Générateurs pour satellites (ex : sondes spatiales avec radio-isotopes),
- Cogénération domestique (production combinée de chaleur et d'électricité),
- Systèmes de climatisation / réfrigération,
- Utilisation avec énergies renouvelables (solaire concentré),
- Systèmes silencieux dans des applications militaires ou sous-marines.

2 Expériences

3 Conclusion