



Chapitre

TP de Thermodynamique : À retenir

4.1 Analyse d'un gaz

4.1.1 Modélisation du Premier Principe

π Définition 1.1 : Énergie interne et Gaz Parfait

Pour un gaz parfait (loi de Joule), la variation d'énergie interne ne dépend que de T . En utilisant $PV = nRT$, on lie ΔU à la variation du produit PV :

$$\Delta U = nC_v \Delta T = \frac{C_v}{R} \Delta(PV)$$

De même pour l'enthalpie : $\Delta H = nC_p \Delta T = \frac{C_p}{R} \Delta(PV)$.

Bilan énergétique

Le premier principe s'écrit $\Delta U = Q_i + W$.

- Chaleur (Q_i) : Énergie injectée par effet Joule ($U \cdot I \cdot \tau$).
- Travail (W) : Travail des forces de pression extérieures ($W = -P_0 \Delta V$).

4.1.2 Exploitation des Pentes (Regressi)

Proposition 1.1 : Identification des coefficients

En traçant les grandeurs énergétiques en fonction de la variation de PV , on identifie les capacités thermiques molaires par les pentes :

- Pente a_1 de la droite $(Q_i + W) = f(\Delta PV) \implies a_1 = \frac{C_v}{R}$
- Pente a_2 de la droite $(Q_i + W + \Delta PV) = f(\Delta PV) \implies a_2 = \frac{C_p}{R}$

Relations fondamentales

- Relation de Mayer : On doit vérifier $a_2 - a_1 = 1$ (soit $C_p - C_v = R$).
- Coefficient adiabatique : $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{a_2}{a_1}$.

4.1.3 Analyse des Écarts et Interprétation

Sources d'erreurs classiques

- **Pertes thermiques** : Le vase n'est pas parfaitement adiabatique. Une partie de Q_i s'échappe vers les parois, ce qui surestime C_v et C_p et conduit à un γ expérimental plus faible ($\approx 1,3$ au lieu de $1,4$).
- **Manomètre** : L'inertie du liquide ou une erreur sur le diamètre D du tube impacte le calcul de ΔV et donc de W .

4.2 Moteur à air chaud

4.2.1 Compréhension du Cycle Stirling

Rôle du Régénérateur

Il agit comme un stockage thermique interne (éponge à chaleur) :

- **Chaud** → **Froid** : L'air cède sa chaleur au cuivre du régénérateur (stockage).
- **Froid** → **Chaud** : L'air récupère cette énergie (préchauffage).
- **Bilan** : Sur un cycle, son échange net d'énergie avec le gaz est nul, mais il augmente l'efficacité en "recyclant" l'énergie interne.

4.2.2 Analyse Qualitative des Phases

Phase	Position Régénérateur	Action sur le gaz
1. Compression	Haut (Zone froide)	Compression à basse température (T_f).
2. Transfert	Descente	Préchauffage à travers le régénérateur.
3. Détente	Bas (Zone chaude)	Expansion à haute température (T_c).
4. Transfert	Montée	Refroidissement à travers le régénérateur.



Inversion de sens

Si on tourne le volant en sens inverse, le déphasage s'inverse : la machine consomme du travail pour transférer de la chaleur du froid vers le chaud (mode **machine frigorifique**).

4.2.3 Modélisation et Exploitation (P, V)



Proposition 2.1 : Diagramme (P, 1/V)

En supposant l'air comme un gaz parfait ($P = nRT \cdot \frac{1}{V}$), les isothermes sont des droites passant par l'origine.

- La pente $k = nRT$ permet d'identifier les températures extrêmes.
- Le rapport des pentes donne le rapport des températures absolues : $\lambda = \frac{T_f}{T_c}$.



Bilan Énergétique

- **Travail (W)** : Aire du cycle dans le plan (P, V). Sens horaire

$\implies W < 0$ (moteur).

- Source froide (Q_f) : Calculée via le réchauffement de l'eau : $Q_f = D_m c_{eau} \Delta T_{eau} \tau$.
- Source chaude (Q_c) : Déduite du 1er principe : $Q_c = -(W + Q_f)$.

4.2.4 Efficacité et Pertes

π Théorème 2.1 : Efficacité de Carnot

L'efficacité maximale théorique entre les deux sources du gaz est :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \lambda$$

Analyse des écarts

- $\eta_{rel} \ll \eta_C$: Dû aux frottements mécaniques et au fait que les transformations ne sont pas de parfaits isothermes (forme en "banane" du cycle).
- $Q_{Joule} > Q_c$: Une grande partie de la chaleur produite par le filament est perdue vers l'extérieur (fuites thermiques) avant même d'entrer dans le gaz.

4.2.5 Outils de calcul et Traitement de données

Calcul du Travail par Intégration

π Définition 2.1 : Travail Mécanique (W)

Le travail reçu par le gaz est l'intégrale de la puissance mécanique sur un cycle :

$$W_{cycle} = \int_0^T -P(t) \frac{dV(t)}{dt} dt = - \oint P dV$$

Sur CASSY, cela correspond à l'aire du cycle (P, V).

! Conversion d'unités CASSY

Les logiciels de TP utilisent souvent des unités non-SI. Pour obtenir des Joules (J) :

- P en hPa (10^2 Pa) et V en cm^3 (10^{-6} m^3).
- Facteur correctif : $W_{SI} = W_{CASSY} \times 10^{-4}$.

Mesure de la Puissance Thermique (Source Froide)

Pour quantifier Q_f , on mesure l'énergie emportée par l'eau de refroidissement.

✓ Méthode du débit au bécher

1. Débit massique (D_m) : On mesure le temps t pour remplir un volume V (ex : 500 mL) dans un bécher/éprouvette.

$$D_m = \rho_{eau} \cdot \frac{V_{becher}}{t} \quad \text{avec } \rho_{eau} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

2. Puissance extraite (P_f) : On mesure l'écart de température $\Delta T = T_{sortie} - T_{entre}$ de l'eau.

$$P_f = D_m \cdot c_{eau} \cdot (T_s - T_e) \quad \text{avec } c_{eau} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

3. Transfert par cycle (Q_f) : Multiplier par la période τ du moteur.

$$Q_f = P_f \cdot \tau$$

4.3 Machine frigorifique

4.3.1 Modélisation du Cycle Frigorifique

π Définition 3.1 : Machine Ditherme à Compression

Dispositif utilisant un travail mécanique w pour transférer de la chaleur d'une source froide ($q_f > 0$) vers une source chaude ($q_c < 0$).

✓ Le cycle sur le diagramme de Mollier (P, h)

Le cycle est composé de quatre organes principaux :

- **A → B (Détendeur)** : Détente isenthalpique ($h_A = h_B$). Chute brutale de P et T .
- **B → C (Évaporateur)** : Vaporisation isobare. Le fluide capte q_f à la source froide.
- **C → D (Compresseur)** : Compression (idéalement isentropique). Reçoit le travail w .
- **D → A (Condenseur)** : Liquéfaction isobare. Le fluide cède q_c à la source chaude.

4.3.2 Calculs Énergétiques (Système Ouvert)

π Proposition 3.1 : Premier Principe en Régime Stationnaire

Pour chaque organe, on utilise la variation d'enthalpie massique h (en kJ/kg) :

- Chaleur source froide : $q_f = h_C - h_B$
- Chaleur source chaude : $q_c = h_A - h_D$
- Travail du compresseur : $w = h_D - h_C$ (ou $w = -(q_f + q_c)$)

✗ Puissances et Débits

Pour passer des grandeurs massiques aux puissances \mathcal{P} (en Watts) :

$$\mathcal{P} = \dot{m}_{\text{fluide}} \cdot \Delta h$$

Attention aux unités : Convertir le débit \dot{m} en kg/s et Δh en J/kg (1 kJ/kg = 10^3 J/kg).

4.3.3 Coefficients de Performance (COP)

π Théorème 3.1 : Efficacités Réelles

Le COP est le rapport $\frac{\text{Utile}}{\text{Payant}}$:

- Mode Machine Frigorifique : $COP_{MF} = \frac{q_f}{w}$
- Mode Pompe à Chaleur : $COP_{PAC} = \frac{|q_c|}{w}$



Limites de Carnot

Les efficacités maximales théoriques dépendent des températures des sources T_F et T_C (en Kelvin) :

$$COP_{MF,Carnot} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad ; \quad COP_{PAC,Carnot} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

4.3.4 Analyses des Pertes et Rendements



Étude des circuits secondaires (Eau)

On vérifie le bilan par l'eau : $\mathcal{P}_{eau} = \dot{m}_{eau} \cdot C_{eau} \cdot \Delta T_{eau}$.

- Si $|\mathcal{P}_{eau}| < |\mathcal{P}_{fluide}|$, il y a des pertes thermiques vers l'air ambiant.
- Rendement du compresseur : $\mathcal{P}_{elec} > \mathcal{P}_w$ car une partie de l'électricité est dissipée par effet Joule et frottements (souvent $\approx 50\%$ de pertes).



Conversion de débit (Rappel)

Pour l'eau (mesure au débitmètre en L/min) :

$$d_{v,SI}(m^3/s) = \frac{d_{v,L/min} \cdot 10^{-3}}{60}$$

Puis $\dot{m}(kg/s) = \rho_{eau} \cdot d_{v,SI}$ (avec $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$).