

THERMODYNAMIQUE DES SYSTÈMES OUVERTS

I Rappels concernant les systèmes fermés

1. Premier principes
 - a) Énoncé b) Énergie interne du gaz parfait c) Exemples
2. Enthalpie
 - a) Définition et propriété b) Gaz parfait c) Phase condensée idéal
3. Second principe
 - a) Énoncé b) Identité thermodynamique et entropie des systèmes modèles c) Exemple de phénomènes irréversibles
4. Efficacité des machines thermiques
5. Changements d'état des corps pur
 - a) Diagramme d'équilibre et enthalpie de changement d'état b) Équilibre liquide vapeur

II Application du premier aux systèmes ouverts

1. Cadre d'étude
2. Premier principe « industriel »
3. Exemples
 - a) Chauffage central b) Compresseur c) Turbine motrice à gaz d) Détente de Joule-Thomson e) Tuyère
4. Cas des systèmes présentant plusieurs entrées et/ou plusieurs sorties

III Application du second aux systèmes ouverts

1. Second principe « industriel »
2. Exemples
 - a) Chauffage central b) Compresseur c) Détente de JT

IV Étude de machines avec changement de phase

1. Cycle de Rankine
2. Pompe à chaleur

Premier principe

Pour tout système thermodynamique fermé, il existe une fonction d'état extensive U appelée énergie interne telle que, lorsque le système évolue d'un état \mathcal{E}_1 à un état \mathcal{E}_2 , la variation de U s'exprime par

$$\Delta U = U(\mathcal{E}_2) - U(\mathcal{E}_1) = W + Q \quad .$$

Plus généralement

$$\Delta U + \Delta E_m = U(\mathcal{E}_2) + E_m(\mathcal{E}_2) - (U(\mathcal{E}_1) + E_m(\mathcal{E}_1)) = W + Q$$

Exercice : compression d'un gaz de Van der Waals.

Une quantité de 10 moles de CO_2 est comprimée de manière isotherme et mécaniquement réversible, à $T = 298 \text{ K}$, du volume $V_1 = 10 \text{ L}$ jusqu'au volume $V_2 = 1 \text{ L}$. On adopte le modèle du gaz de Van der Waals dont l'équation d'état s'écrit, pour une seule mole,

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad .$$

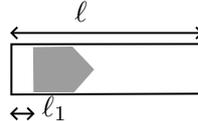
Calculer le travail reçu par le gaz et le transfert thermique depuis le thermostat. On donne $a = 0,36 \text{ J.mol}^{-2}.\text{m}^3$, $b = 4,3.10^{-5} \text{ m}^3.\text{mol}^{-1}$. Énergie interne du gaz de Van der Waals : $U = nC_{cm}T - an^2/V$.

Exercice : Entrée d'air dans un ballon

Un ballon en verre préalablement vidé est muni d'un robinet communiquant avec l'air ambiant, de température T_0 . On ouvre momentanément le robinet puis on le referme. Trouver la température de l'air après son entrée dans le ballon.

Exercice : Propulsion d'un obus

Un obus de masse $m = 1 \text{ kg}$ se trouve dans un canon de section S et de longueur $\ell_2 = 1 \text{ m}$. La combustion de la poudre, quasi-instantanée, produit $n = 10$ moles de gaz parfait diatomique à la température $T_1 = 1500 \text{ K}$, dans une section de longueur $\ell_1 = 5, \text{ cm}$ au fond du canon. Quand l'obus atteint l'extrémité du canon, la température des gaz est T_2 . Trouver à cet instant la vitesse de l'obus.



Second principe

Pour tout système thermodynamique fermé, il existe une fonction d'état extensive S appelée entropie telle que, lorsque le système évolue d'un état \mathcal{E}_1 à un état \mathcal{E}_2 , la variation de S s'exprime par

$$\Delta S = S(\mathcal{E}_2) - S(\mathcal{E}_1) = S_e + S_c$$

où

$$S_e = \frac{Q}{T_e} \quad T_e \text{ température d'échange}$$

$$S_c \geq 0 \quad S_c = 0 \text{ pour une transformation réversible.}$$

Exercice : Climatiseur

Un climatiseur de puissance électrique $P = 2,5 \text{ kW}$ refroidit une pièce de capacité calorifique C depuis la température T_i , égale à la température extérieure $T_2 = 35^\circ\text{C}$, jusqu'à la température $T_f = 25^\circ\text{C}$. Trouver une borne inférieure du temps nécessaire pour cela.

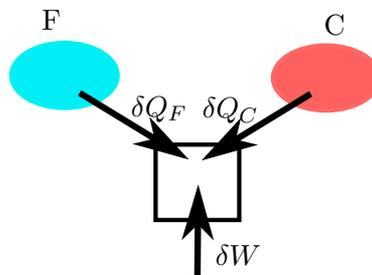


FIGURE 1 – Transferts thermiques dans un climatiseur

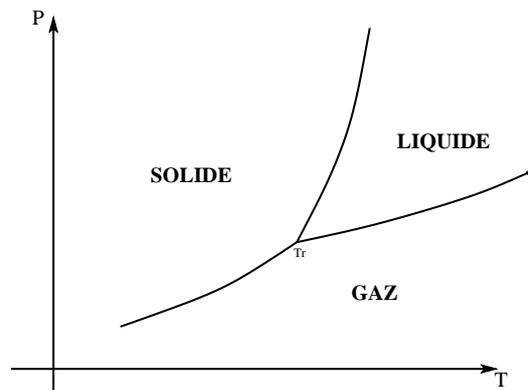


FIGURE 2 – Diagramme d'état d'un corps pur

Exercice :

On porte 10 kg d'eau à 300°C dans un volume $V = 10 \text{ L}$. À cette température, on donne $v_g = 22 \text{ L.kg}^{-1}$ et $v_l = 1,4 \text{ L.kg}^{-1}$. Trouver les masses de liquide et de vapeur.

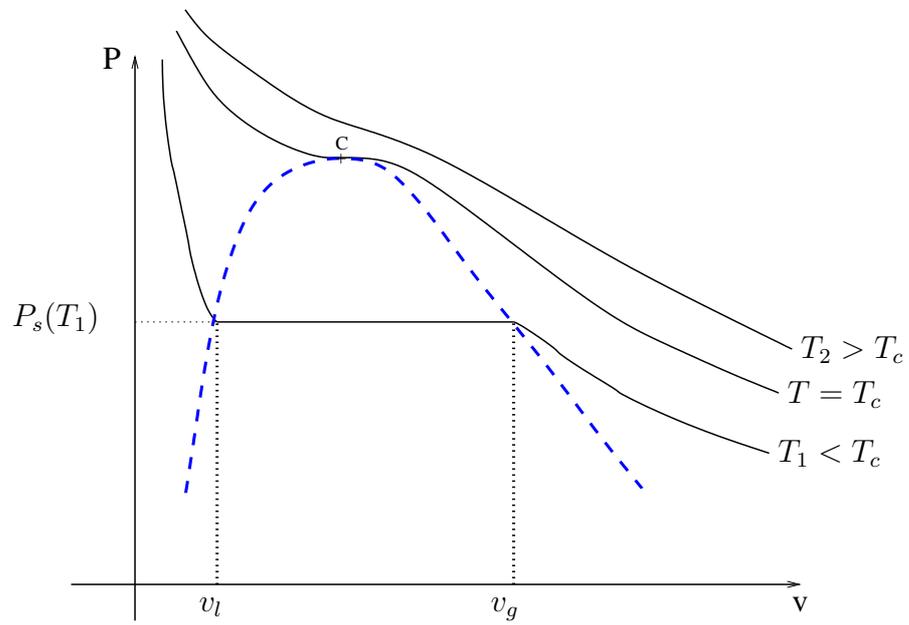


FIGURE 3 – Diagramme de Clapeyron d'un corps pur

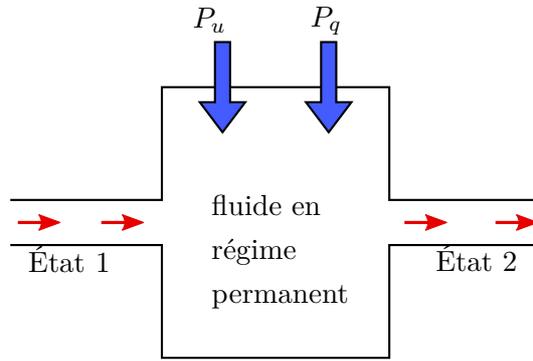


FIGURE 4 – Machine thermique à flux continu

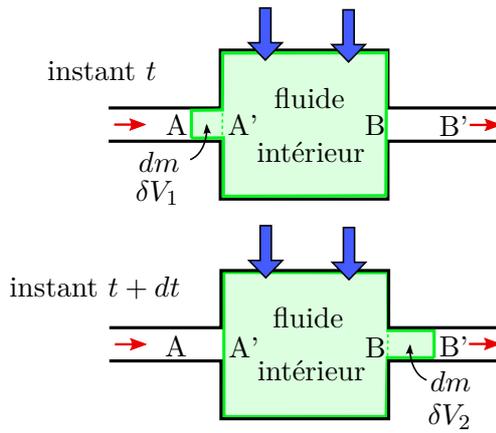


FIGURE 5 – Application du premier principe à une machine à flux continu

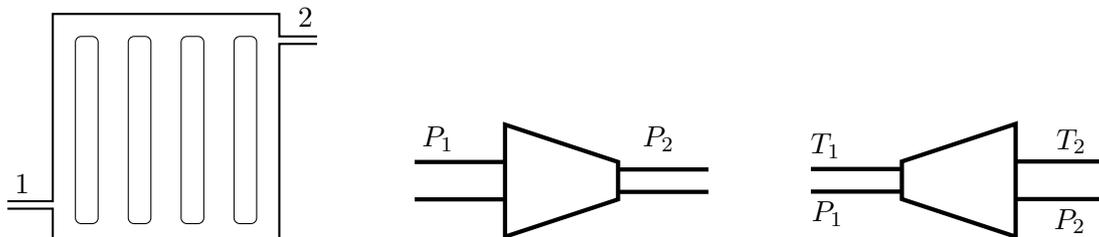
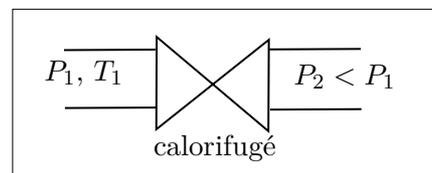
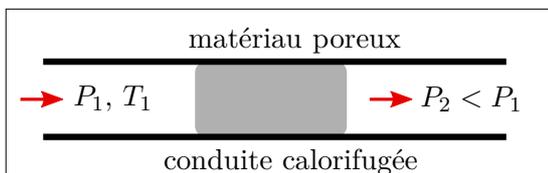


FIGURE 6 – Divers dispositifs à flux continu : radiateur de chauffage central, compresseur, turbine motrice à gaz. En dessous : détente de Joule-Thomson, robinet détenteur



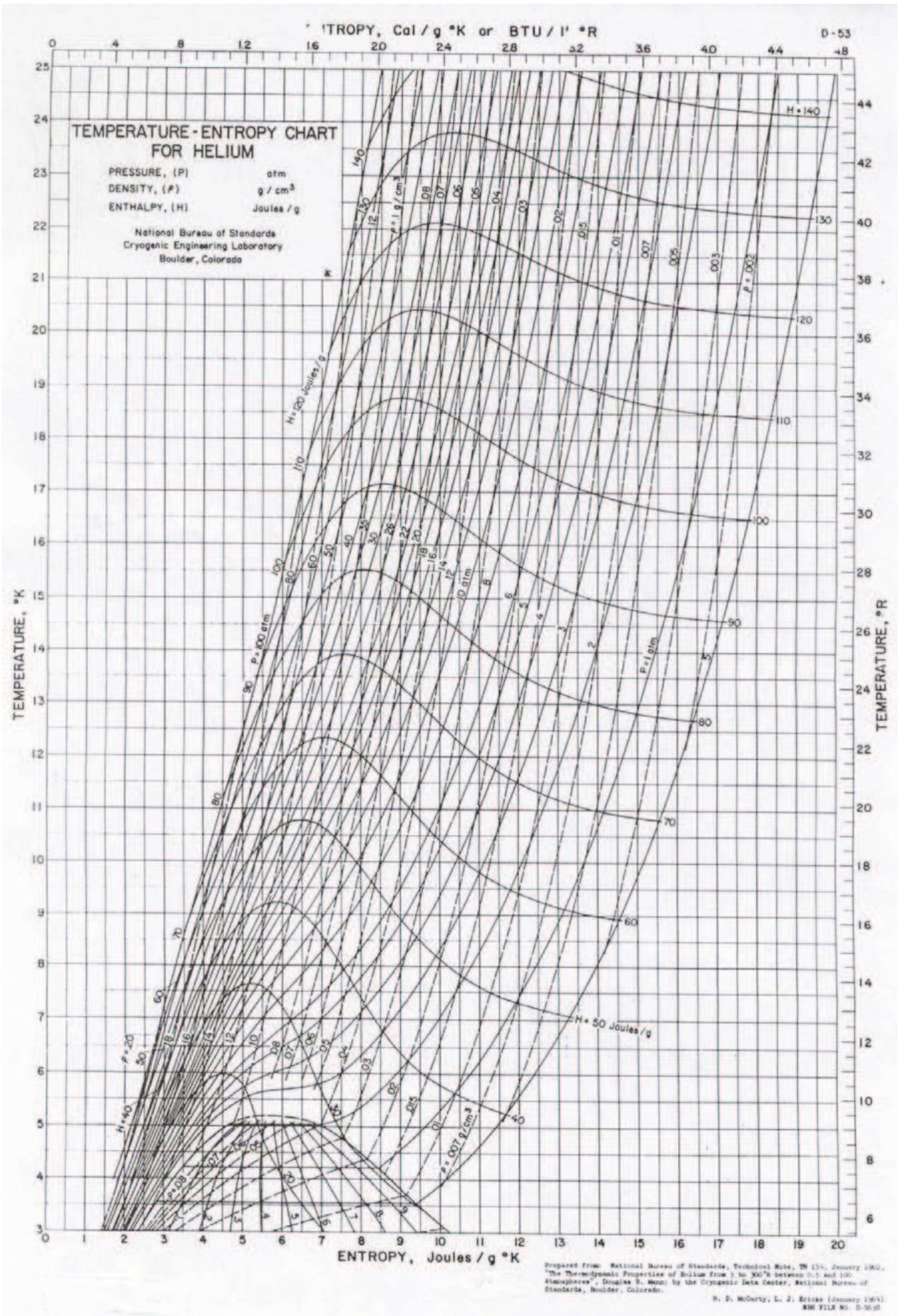


Figure 3: T-s Diagram for Helium (issued by NBS)

Cycle de Rankine

- **A** : liquide saturant à T_1
- **AB** : compression ad. rév. $p_1 \rightarrow p_2$
- **BC** : échauffement isobare du liquide jusqu'à saturation
- **CD** : vaporisation isobare totale
- **DE** : détente ad. rév. dans la turbine $p_2 \rightarrow p_1$
- **EA** : liquéfaction totale sous pression p_1

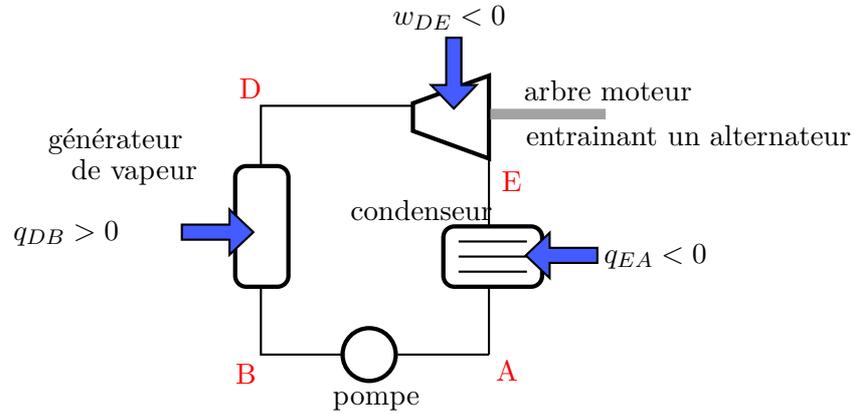


FIGURE 7 – cycle de Rankine

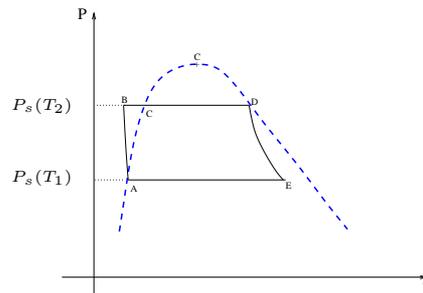


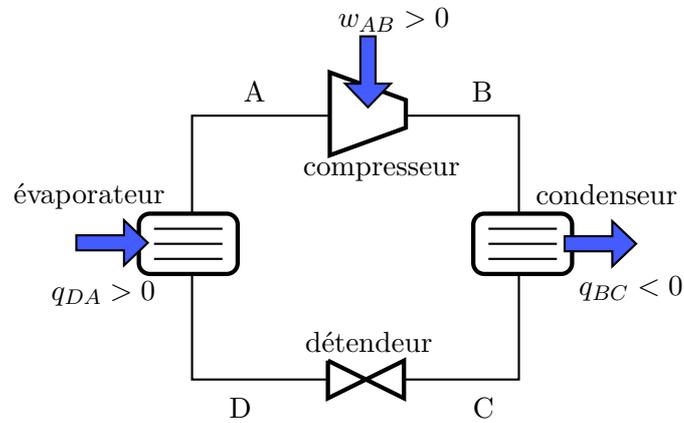
FIGURE 8 – Cycle de Rankine dans le diagramme de Clapeyron

T	h_L (kJ/kg)	s_L (kJ/kg/K)	h_v (kJ/kg)	s_v (kJ/kg/K)
$T_1 =$				
$T_2 =$				

TABLE 1 – Données thermophysiques relatives à l'eau liquide bouillante et la vapeur d'eau saturante

Cycle d'une pompe à chaleur

- **A** : gaz à $T_A = 5^{\circ}\text{C}$, $P_A = P_1 = 3\text{ bar}$
- **AB** : compression ad. rév. $p_1 \rightarrow p_2 = 10\text{ bar}$
- **BC** : condensation isobare jusqu'au liquide saturant
- **CD** : détente adiabatique jusqu'à la pression P_1
- **DA** : évaporation pour revenir à l'état A



Ne pas oublier les fichiers [mollier_chart_water.pdf](#), [Diagramme-Ts-eau.pdf](#), [mollier_R124a.pdf](#)