TD n°3
Systèmes ouverts en régime stationnaire

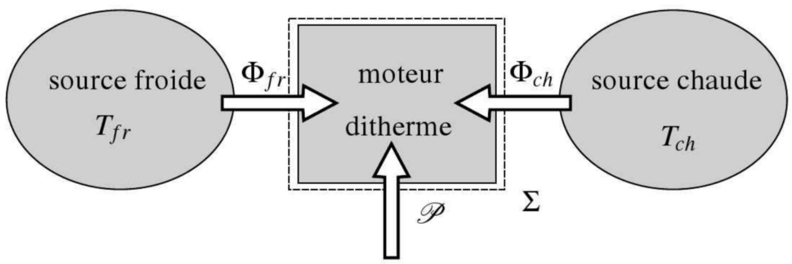
On rappelle que l'entropie massique d'un gaz parfait de masse molaire M ne dépend que de la température T et de la pression P et s'écrit :

$$s(T,P) = c_p \ln(T) - \frac{R}{M}\ln(P) + C$$

où C est une constante.

Exercice 1 : Moteur ditherme en régime stationnaire ⋆ | ⚓ 🛟

Un moteur ditherme est en contact avec une source froide de température T_{fr} et une source de température $T_{ch} > T_{fr}$. Les flux thermiques échangés avec ces sources sont respectivement Φ_{fr} et Φ_{ch}. On note $\mathcal{P}$ la puissance mécanique échangée avec l'extérieur. Tous ces transferts sont comptés positivement quand ils sont effectivement reçus par le moteur. La machine fonctionne en régime stationnaire.



1. Quels sont les signes de Φ_{fr}, Φ_{ch} et $\mathcal{P}$?
2. Appliquer le premier principe au système $\Sigma = moteur$ entre t et $t + dt$.
3. Appliquer le second principe au système $\Sigma = moteur$ entre t et $t + dt$.
4. En déduire l'expression du rendement du moteur dans le cas où il n'y a aucune source d'irréversibilité interne au moteur.

Exercice 2 : Cycle monotherme ⋆ | 🛟

On considère un système constitué d'un gaz parfait ($\gamma = 1,4$) n'échangeant de chaleur qu'avec un thermostat à la température $T_0 = 300\,\mathrm{K}$. On considère également deux états A et C de ce système, tels que :

$$A : \begin{cases} T_A &= T_0 \\ P_A &= 10^5\,\mathrm{Pa} \\ V_A &= 1\,\mathrm{L} \end{cases} \qquad C : \begin{cases} T_C &= T_0 \\ P_C & \\ V_C &= 2\,\mathrm{L} \end{cases}$$

On envisage deux transformations du système entre l'état A et l'état C :

- transformation (1) : isotherme réversible de A à C ;
- transformation (2) : adiabatique réversible de A à B, puis isochore de B à C.

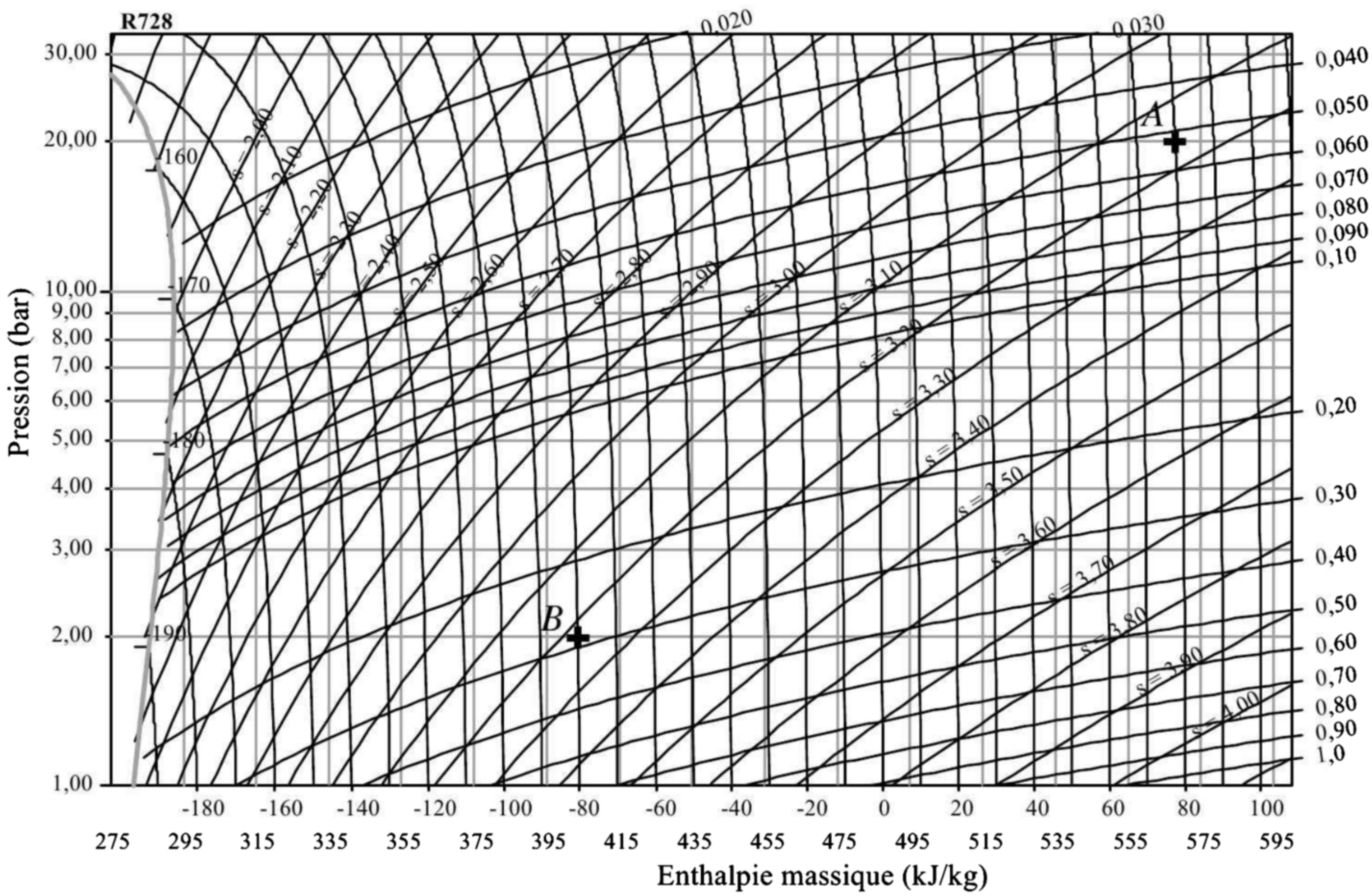
1. Indiquer comment réaliser pratiquement ces deux transformations. Que peut-on dire de la réversibilité de l'étape $B - C$ de la transformation (2) ?

2. Placer A, B et C sur un diagramme de Clapeyron (P, V). Calculer P_B et T_B.
3. Calculer le travail mécanique et les transferts thermiques reçus par le système au cours de (1) et (2).
4. Le système est considéré comme une machine thermique fonctionnant avec une seule source de chaleur, quel est le seul chemin possible : $A - B - C - A$ ou $A - C - B - A$?

Exercice 3 : Le fluide R728

⋆ | ⚓ ♜

La figure ci-dessous représente une partie du diagramme $(\ln P, h)$ du fluide $R728$ dans le domaine où ce fluide est gazeux. Les températures sont en °C, les volumes massiques en $\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}}$, les entropies massiques en $\mathrm{kJ \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$.



1. Le gaz se comporte-t-il comme un gaz parfait ? Si ce n'est pas le cas, dans quelle partie du diagramme s'en rapproche-t-il le plus ?
2. Evaluer la capacité thermique massique à pression constante du fluide pour $P = 10^5\,\mathrm{Pa}$ en la supposant constante sur tout le domaine de température représenté.
3. Sachant qu'il s'agit d'un gaz diatomique, déterminer sa masse molaire et en déduire la nature de ce fluide.

Ce fluide s'écoule à travers une machine et passe de l'état correspondant au point A à l'état correspondant au point B du diagramme.

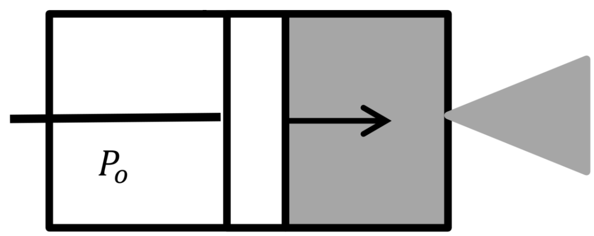
4. Déterminer à partir des valeurs lues sur le diagramme : $[h]_A^B$, $[u]_A^B$, $[s]_A^B$. Peut-on déterminer q, w_u, $w_{pression}$, $s_{éch}$ et $s_{créée}$?

5. Cette transformation se fait dans une tuyère horizontale, adiabatique et ne comportant aucune pièce mobile. Évaluer :
   a) la vitesse du gaz à la sortie de la tuyère, sachant que la vitesse à l'entrée est quasiment nulle.

   b) l'entropie créée par unité de masse de gaz dans la tuyère.

Exercice 4 : Étude d'un spray ⋆ | ⚓

Un gaz, supposé parfait, s'écoule de façon adiabatique vers l'extérieur à travers un petit orifice percé dans un récipient cylindrique. La pression du gaz restant dans le cylindre est maintenue constante par le déplacement d'un piston. On suppose que la transformation subie par le gaz dans le cylindre est réversible.



1. Justifier que dans ce cas la température à l'intérieur du récipient reste constante.

2. En dehors du récipient, la température diminue par suite de détente adiabatique, jusqu'à une valeur T_f très inférieure à la température intérieure T_0. Evaluer la vitesse du gaz dans le jet, en fonction de T_0 et de sa capacité thermique massique à pression constante c_p.

Exercice 5 : Climatiseur ⋆⋆ | ♝♜

Un climatiseur est une machine thermique ditherme. Elle décrit des cycles à partir de deux sources thermiques constituées d'une part par l'air extérieur de température invariable $T_e = 298\,\mathrm{K}$ et d'autre part par une pièce de température initiale $T_i = T_e$ que l'on désire porter à la température $T_f = 293\,\mathrm{K}$. On suppose que la machine fonctionne de façon réversible.

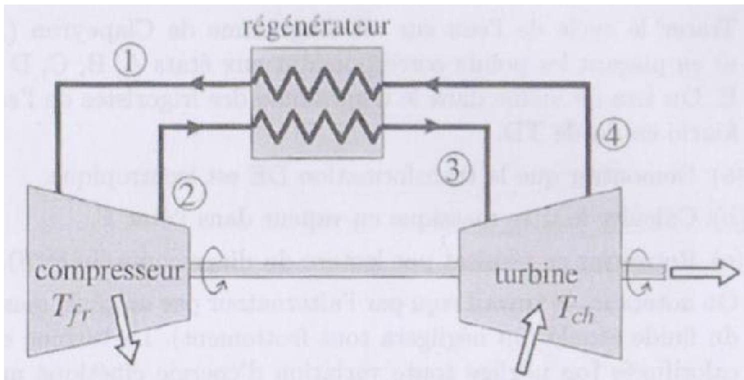
1. Déterminer le travail électrique W_r nécessaire à la machine dans le cas où son fonctionnement est réversible. On supposera que la pièce (de capacité thermique $C = 5 \times 10^3\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1}}$) n'échange de l'énergie thermique qu'avec la machine.
Indication : on pourra appliquer les premier et second principes à la machine sur un cycle pour trouver le lien entre le transfert thermique et le travail mécanique. Faire attention au système considéré et aux signes des grandeurs !

2. Quel est le temps nécessaire à la mise en température de la pièce pour une puissance électrique de $250\,\mathrm{W}$?

3. Il existe maintenant un flux thermique entre la pièce de température T et l'air extérieur caractérisé par une puissance thermique : $P_{th} = h(T_e - T)$. La puissance électrique d'alimentation n'est pas modifiée, quelle est la température en régime stationnaire ?

Exercice 6 : Cycle d'Ericsson ⋆⋆ |

Un gaz parfait circule en régime stationnaire dans une machine et subit le cycle de transformations suivant :



- Transformation $1 \to 2$: compression réversible et isotherme dans un compresseur à la température T_1 de la pression P_1 à la pression P_2. Un thermostat maintient les parois du compresseur à la température T_1.
- Transformation $2 \to 3$: échauffement isobare de T_1 à $T_3 > T_1$.
- Transformation $3 \to 4$: détente réversible et isotherme dans une turbine, à la température T_3, de P_2 à P_1.
- Transformation $4 \to 1$: refroidissement isobare de T_3 à T_1.

Les transformations $2 \to 3$ et $4 \to 1$ ont lieu dans un régénérateur : il s'agit d'un échangeur thermique possédant deux courants de fluides en sens inverse. Il n'y a pas de parties mobiles et les parois externes sont adiabatiques. Le fluide y circule dans deux canalisations, en sens opposé, ce qui donne lieu à des échanges thermiques.
On néglige les variations d'énergie cinétique macroscopique et d'énergie potentielle de pesanteur. La turbine et le compresseur sont montés sur le même arbre, sur lequel est aussi monté un alternateur destiné à produire de l'électricité. On notera $r = \dfrac{R}{M}$ la constante massique du gaz parfait utilisé.

1. Exprimer les transferts thermiques massiques q_{12} et q_{34} reçus par le gaz respectivement dans le compresseur et dans la turbine.
   Astuce : passer par le calcul de l'entropie.
2. Exprimer les travaux utiles massiques $w_{u,12}$ et $w_{u,34}$ au niveau du compresseur et de la turbine. Quel est alors le travail massique w_a reçu par l'alternateur (par unité de masse de gaz entrant ou sortant des machines) ?
3. En déduire le rendement de la machine, défini par : $\eta = \dfrac{|w_a|}{q_{34}}$.
