

Exercices de thermodynamique

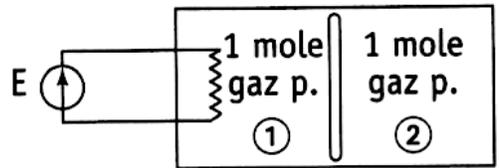
Exercice de thermodynamique 1 Transformation isotherme d'un gaz réel

On fait subir à un kilogramme de gaz, contenu dans un cylindre muni d'un piston, une transformation isotherme réversible qui le fait passer de l'état $P_1=0,67$ atm, $T_1=422$ K à l'état $P_2=4,56$ atm. Préciser les échanges d'énergie nécessaires à la réalisation de cette transformation. Pour ce gaz, les tables donnent :

	P_1, T_1	P_2, T_1
$h(\text{kJ}.\text{kg}^{-1})$	2777	2743
$s(\text{kJ}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$	7,785	6,846
$v(\text{m}^3.\text{kg}^{-1})$	2,809	0,4035

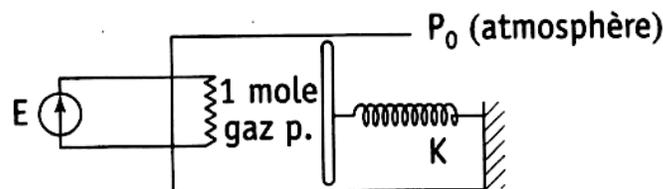
Exercice de thermodynamique 2 Chauffage d'un gaz

On considère un réservoir à parois adiabatiques séparé en deux parties par un piston adiabatique et mobile sans frottement. Initialement, chaque compartiment contient $n_0 = 1$ mol du même gaz parfait, à la pression $P_0 = 1$ bar et à la température $T_0 = 290$ K. Pour le gaz considéré, $\gamma = C_p/C_V = 1,40$. Grâce à une résistance électrique, on chauffe progressivement le gaz ① dans le compartiment de gauche, jusqu'à avoir la pression $P_1 = 2P_0$.



1. Déterminer l'état final du gaz dans chacun des deux compartiments.
2. Calculer le transfert thermique Q reçu par le gaz de gauche de la part de la résistance ainsi que le travail reçu par le gaz de droite.

La mole de gaz considérée précédemment est maintenant contenue dans un cylindre adiabatique fermé par un piston - lui-même adiabatique - de section $S = 0,05$ m², retenu par un ressort de raideur $k = 25$ kN.m⁻¹. Il n'y a pas de frottement. Le gaz est dans le même état initial que précédemment et il est à nouveau chauffé progressivement jusqu'à ce que la pression soit $P = 2P_0$.



1. Déterminer l'état final du gaz. Déterminer $P(V)$ au cours du chauffage.
2. Calculer le transfert thermique Q_1 reçu par le gaz de la part de la résistance ainsi que l'énergie absorbée par le ressort.

Exercice de thermodynamique 3 Point triple

Un récipient à parois adiabatiques de volume $V_0=1\text{L}$ contient un mélange de glace, d'eau liquide et de vapeur d'eau à la température T_3 et la pression P_3 du point triple ($T_3=273,16\text{ K}$, $P_3 \approx 600\text{Pa}$). La masse initiale d'eau liquide est $m_0=50\text{g}$. Une pompe aspire la vapeur d'eau avec un débit $D=0,1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, on suppose l'évolution quasi statique et la vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait. *Données* : $\ell_{fus}(T_3)=335\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $\ell_{vap}(T_3)=2,54\cdot 10^3\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

1. Préciser l'évolution de l'eau contenue dans le récipient.
2. Au bout de combien de temps la température de l'eau commencera-t-elle à varier ? Quel sera le contenu du récipient à cet instant ?

Exercice de thermodynamique 4 Vaporisation dans le vide

Dans un réservoir initialement vide, de volume invariable $V_0=5\text{L}$, on introduit deux grammes d'eau liquide, pris à la pression atmosphérique $P_0=1\text{ bar}$ et à la température $T_0=290\text{ K}$.

1. Le réservoir et son contenu sont portés à la température $T_1=350\text{ K}$ par l'intermédiaire d'un thermostat.
 - (a) Déterminer l'état d'équilibre de l'eau sachant que la pression d'équilibre liquide-vapeur de l'eau à la température T_1 vaut $P_s(T_1)=0,46\text{ bar}$.
Quelle est l'énergie thermique absorbée par les 2g d'eau ?
La vapeur d'eau sera assimilée à un gaz parfait de masse molaire $M=18\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide $c_l=4,19\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et la chaleur latente de vaporisation de l'eau à T_1 , $\ell_{vap}(T_1)=2,30\cdot 10^3\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
 - (b) Faire un bilan d'entropie.
2. A partir de l'état d'équilibre précédent on chauffe le réservoir et son contenu jusqu'à $T_2=373\text{ K}$ ($P_s(T_2)=1,00\text{ bar}$). Calculer l'énergie absorbée par l'eau. On donne : $\ell_{vap}(T_2)=2,24\cdot 10^3\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et la capacité thermique molaire à volume constant de l'eau vapeur $C_{V_m}=21\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Exercice de thermodynamique 5 Evolution isenthalpique

Un récipient cylindrique horizontal est fermé par un piston pouvant coulisser sans frottement. La pression extérieure est maintenue constante et égale à $P_0=1\text{ bar}$.

Le récipient est initialement séparé en deux compartiments par une paroi adiabatique escamotable. Le compartiment de gauche contient de l'eau liquide saturée ($m_1=1\text{kg}$; $P_0=1\text{ bar}$, $T_1=373\text{ K}$), celui de droite est rempli d'eau vapeur ($m_2=2\text{ kg}$; $P_0=1\text{ bar}$, $T_2=478\text{ K}$). Le piston et les parois du récipient sont adiabatiques.

On supprime la paroi (sans apport de travail). On donne les valeurs numériques suivantes :

	P_0, T_1	P_0, T_2
$h_l(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	419	
$h_v(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	2675	2884
$s_l(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1,306	
$s_v(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	7,354	7,847

1. Déterminer l'état final du système.
2. Calculer la variation d'entropie ΔS .
3. Exprimer également cette variation d'entropie en fonction de $\ell_{vap}(T_1)$ et de la capacité thermique à pression constante de la vapeur c_p , que l'on considérera constante sur la plage de température T_1 - T_2 . Evaluer $\ell_{vap}(T_1)$ et c_p puis ΔS . Conclure.

Exercice de thermodynamique 6 Equilibre entre deux gaz

Un gaz A est placé dans un compartiment indéformable de volume constant V_A . Un gaz B est placé dans un cylindre où la pression est maintenue constante à l'aide d'un piston. Initialement, les températures des gaz sont T_{A0} et T_{B0} . On place ces deux systèmes en contact et on suppose la paroi qui les sépare diathermes alors que les autres parois sont calorifugées.

1. Déterminer la température finale du système. On ne suppose pas les gaz parfaits.
2. Déterminer la variation d'entropie du système des deux gaz. Peut-on prévoir son signe ?

Exercice de thermodynamique 7 Cycle Diesel

Un gaz parfait décrit le cycle suivant :

- A-B : Compression adiabatique réversible
- B-C : Combustion à pression constante
- C-D : Détente adiabatique réversible
- D-A : Ejection des gaz à volume constant

1. Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron.
2. Exprimer le rendement du moteur en fonction des rapports volumétriques $a = V_A/V_B$, $b = V_D/V_C$ et de γ .

Exercice de thermodynamique 8 Moteur

Etude d'un moteur réversible, utilisant un gaz parfait décrivant le cycle suivant :

- A-B : Détente isotherme à T_1 jusqu'à $V_B = k_1 V_A$
- B-C : Détente adiabatique $T_1 \rightarrow T_2$
- C-D : Détente isotherme à T_2 jusqu'à $V_D = k_2 V_C$
- D-E : Détente adiabatique $T_2 \rightarrow T_3$
- E-F : Compression isotherme à T_3 jusqu'à $V_F = k_3 V_E$
- F-A : Compression adiabatique

1. Tracer le diagramme de Clapeyron. Donner les sources chaudes et froides.
2. Exprimer le rendement en fonction de $T_1, T_2, T_3, k_1, k_2, k_3$.
3. Donner une relation entre k_1, k_2, k_3 .
4. En supposant T_1, T_2, T_3 fixées, à quelle condition le rendement est-il maximal ?

Exercice de thermodynamique 9 Moteur

1. Un moteur fonctionne avec deux sources, l'une à $T_1 = 10^\circ\text{C}$, l'autre à $T_2 = 2100^\circ\text{C}$. La puissance mécanique du moteur vaut $\mathcal{P}_m = 4.7 \text{ MW}$. Déterminer la puissance thermique minimale \mathcal{P}_{th} .

2. Ce moteur fonctionne avec des gaz parfaits de rapport $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$. Le gaz subit un cycle, de la forme suivante (sont données les pressions P_C et P_A ainsi que les volumes $v_A = v_D$ et $v_C = v_B$) :
 - A-B : compression adiabatique réversible
 - B-C : réchauffement isochore au contact d'une source à la température $T_2 > T_C$
 - C-D : détente adiabatique réversible
 - D-A : refroidissement isochore au contact d'une source à la température $T_1 < T_A$
 Déterminer son rendement (+ une autre question non traitée)

Exercice de thermodynamique 10 Refroidissement d'un gaz parfait

On fait subir à n moles de gaz parfait une suite de compressions isothermes réversibles et de détentes adiabatiques réversibles entre les pressions p_1 et $p_2 > p_1$. Chaque compression est suivie d'une détente. Dans l'état initial, la pression du gaz est p_1 et sa température T_0 .

1. Représenter dans un diagramme de Clapeyron (p, V) la suite des transformations subies par le gaz. Déterminer les températures T_N des différentes isothermes après N détentes.
2. Mettre en évidence les échanges énergétiques ayant lieu entre le gaz et l'extérieur. On calculera notamment le travail total W_N et la chaleur totale Q_N reçus par le gaz après la succession des N compression-détente. Déterminer les limites de W_N et de Q_N lorsque N tend vers l'infini à T_0 , p_1 et T_f fixés, où T_f représente la température finale. Commenter ces résultats.

Exercice de thermodynamique 11 Détente d'un liquide dans le vide

On place une ampoule contenant $m = 0,01$ kg d'eau liquide dans une enceinte de volume V maintenue au contact d'un thermostat à la température $T_0 = 373\text{K}$. Initialement, l'enceinte est vide et l'eau dans l'ampoule est à la température T_0 et sous la pression p_0 égale à la pression de vapeur saturante à T_0 de 1 bar. On assimile la vapeur d'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18$ g/mol. On donne l'enthalpie de vaporisation de l'eau $l_v = 2,3 \cdot 10^3$ kJ/kg à la température T_0 . On néglige le volume massique de l'eau liquide devant le volume massique de la vapeur d'eau.

1. Calculer la valeur particulière V_C du volume V pour que dans l'état d'équilibre final, l'eau soit à la température T_0 et à la pression de vapeur saturante $p_0 = 1\text{bar}$, entièrement sous forme vapeur. Calculer pour l'évolution $I \rightarrow F$ correspondante le transfert thermique Q algébriquement reçu par l'eau, l'entropie échangée et l'entropie créée. Commenter.
2. On suppose le volume V inférieur à la valeur V_C trouvée précédemment. Déterminer l'état d'équilibre final.
3. On suppose le volume V supérieur à la valeur V_C trouvée précédemment. Déterminer l'état d'équilibre final.

Exercice de thermodynamique 12 Calorimétrie

Une masse $m_{Fe} = 1,4$ kg de fer ($c_p = 460$ J.kg⁻¹.K⁻¹), sortant d'un four à la température T est plongée dans de l'eau d'un calorimètre initialement à la température $T_0 = 0$ °C. La capacité thermique du calorimètre est $C = 3170$ J/K, la masse d'eau initiale est de $m_{eau} = 7$ kg. La température se fixe à $T_F = 15$ °C. Au moment de l'immersion une masse x d'eau est vaporisée à la température de 100 °C. Si on ne tient pas compte de cette vaporisation, le calcul donne une valeur erronée T' . Quelle doit être la valeur de x pour que l'erreur commise soit de 5% sur l'évaluation de T .

Données : enthalpie de vaporisation de l'eau à 100 °C : $l_v = 2,255 \cdot 10^3$ kJ.kg⁻¹ ; capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,185$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹

Exercice de thermodynamique 13

On considère la transformation suivante, où les températures et les pressions seront indexées par le numéro de l'état : T_i, p_i .

- 1-2 compression adiabatique réversible
- 2-3 combustion isobare
- 3-4 détente adiabatique réversible dans une turbine
- 4-5 détente adiabatique réversible dans une tuyère

L'air est considéré comme un gaz parfait. On donne $T_1 = 288 \text{ K}$, $p_1 = 1.0 \text{ bar}$, $T_3 = 1250 \text{ K}$, $p_2 = 6.15 \text{ bar}$, $p_5 = p_1$. Dans la turbine, la totalité de la puissance mécanique est utilisée pour compresser le gaz.

On donne $c_p = 1.0 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\gamma = 1.4$. Calculer T_2 , $w_{1 \rightarrow 2}$, T_4 , p_4 , T_5 et c_5 la vitesse de l'air en sortie (on négligera l'énergie cinétique dans toutes les parties de la machine sauf la tuyère).

Exercice de thermodynamique 14

 Détente d'un gaz parfait dans une turbine

Un gaz parfait diatomique, pour lequel on donne la capacité thermique massique $c_p \approx 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, traverse une turbine. Ce dispositif est un système ouvert, traversé par un fluide qui met en mouvement une hélice. Les parois sont calorifugées et la rotation mécanique entraîne une machine électrique, qui convertit la puissance mécanique en puissance électrique. On s'intéresse au régime stationnaire, le débit massique de fluide étant égal à $1,5 \text{ kg.s}^{-1}$. On précise les propriétés du fluide à l'entrée : pression $p_e = 10 \text{ bars}$, température $\theta_e = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ et en sortie : pression $p_s = 1 \text{ bar}$, température $\theta_s = 280 \text{ }^\circ\text{C}$. On néglige les variations d'énergie cinétique du fluide.

1. Par un bilan énergétique, déterminer la puissance mécanique cédée par la turbine à la machine électrique. Commenter le signe.
2. Par un bilan d'entropie, préciser si l'évolution est réversible.
3. Quelle serait la température de sortie si l'évolution était réversible? Définir et calculer un rendement de la turbine réelle par rapport à la turbine fonctionnant de façon réversible.

Exercice de thermodynamique 15

 Comparaison de différentes détentes

Différentes détentes de fluide sont utilisées dans les applications. On considère ici 3 détentes adiabatiques :

- détente de Joule-Thomson
 - détente dans une turbine
 - détente dans une tuyère (dans une conduite de section variable le fluide se détend et acquière de l'énergie cinétique).
1. Comment se traduisent en régime stationnaire les équations bilans de ces trois détentes?
 2. Quelles différences y a-t-il entre les conditions d'une détente de Joule-Thomson et d'une détente dans la tuyère? Que peut-on dire de l'énergie cinétique en sortie?

Exercice de thermodynamique 16

 Entropie créée dans un mélangeur

Un écoulement d'eau à la température $T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ pénètre par l'entrée (1) d'un mélangeur calorifugé et isobare dans lequel règne une pression de 1 bar. Il s'y mélange avec un écoulement de vapeur d'eau à la température $T_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ entrant par l'entrée (2). L'écoulement résultant du mélange isobare des deux fluides émerge de la chambre de mélange à la température $T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. On note $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ la température du milieu extérieur autour du mélangeur, dans son environnement immédiat.

On donne les débits massiques des écoulements entrants : $D_m^1 = 0.938 \text{ kg s}^{-1}$ et $D_m^2 = 0.062 \text{ kg s}^{-1}$. Les données thermodynamiques utiles sont regroupées dans le tableau suivant :

état	1	2	3
$h(\text{kJ.kg}^{-1})$	42	2746	209,6
$s(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$	0,151	6,838	0,703

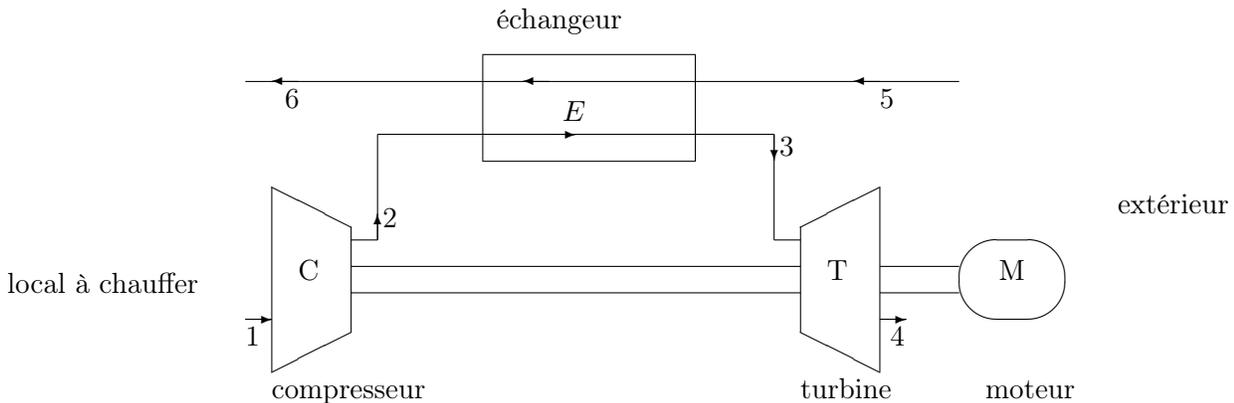
1. Montrer que l'hypothèse de mélangeur calorifugé est bien légitime.
2. Etablir l'expression littérale et la valeur numérique du taux de création d'entropie dans le mélangeur. Commenter.

Exercice de thermodynamique 17 Air conditionné

L'installation schématisée a pour but de chauffer un local et d'en renouveler l'air. Celui-ci est prélevé en (1) et rejeté en (4) et, parallèlement, on aspire de l'air frais en (5) et on l'injecte dans le local en (6). On négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle ainsi que les pertes dans les machines. Les évolutions sont réversibles. Le débit massique d'air aspiré en (1) est égal à celui refoulé en (6). L'air est assimilé à un gaz parfait de capacité thermique massique à pression constante $c_p=1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\gamma=1,4$.

Données :

- température extérieure : $T_5=273 \text{ K}$; température minimale dans le local $T_1=293 \text{ K}$.
 - pression ambiante, dans le local et à l'extérieur : $p_1 = p_4 = p_5 = p_6 = 1 \text{ bar}$.
 - on note $x = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$
 - l'échangeur E est caractérisé par $\Delta T = T_2 - T_6=20 \text{ K}$. Par ailleurs il fonctionne de façon isobare pour chaque circulation, ainsi $p_2 = p_3$.
1. En effectuant des bilans sur les divers éléments exprimer la puissance P_m du moteur en fonction du débit D_m , de c_p , T_1 , T_5 , ΔT et x .
 2. Montrer que $T_6 = xT_1 - \Delta T$.
 3. Le fait de remplacer l'air vicié par l'air neuf est à l'origine d'un transfert thermique entre le local et l'extérieur, soit $P_{1-6} = D_m c_p (T_6 - T_1)$. On définit le coefficient d'effet calorifique $\phi_c = P_{1-6}/P_m$. La valeur numérique de x rendant ϕ_c maximal est $x = 1,147$. En déduire la valeur numérique du taux de compression, du coefficient d'effet calorifique et celle de la température T_6 .



Par souci de confort, on fixe $T_6=300\text{K}$, recalculer x , le taux de compression et le coefficient d'effet. Commenter.

Exercice de thermodynamique 18 Vapeur sursaturée

Une enceinte adiabatique de volume variable (ensemble piston + cylindre sans frottement) se trouve dans un laboratoire où la pression ambiante est $P_0=1,0$ bar. Le piston, qui fait office de couvercle, est supposé de masse nulle pour simplifier. Cette enceinte est remplie uniquement avec de la vapeur d'eau sursaturée à la température $T=97^\circ\text{C}$ (état métastable). Par une légère perturbation de l'enceinte, l'expérimentateur amorce la rupture de la sursaturation : l'eau rejoint presque immédiatement son état d'équilibre stable. Quelle fraction de la vapeur d'eau passe à l'état liquide ?

Donnée : chaleur latente de vaporisation de l'eau sous $p=1,0$ bar : $\ell_{eb}=2250 \text{ kJ.kg}^{-1}$; capacité thermique massique à pression constante de la vapeur à $T \approx 100^\circ\text{C}$: $c=2,03 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exercice de thermodynamique 19 Laminage du fréon

On détend du fréon dans un robinet de laminage (détente de Joule-Thomson) à partir d'un état correspondant au liquide de saturation à $T_1=303$ K et qui amène à un état de température $T_2=237$ K. Le robinet de laminage est supposé parfaitement calorifugé.

- Déterminer cet état final. On précisera les valeurs de h_2 , x et s_2 . On donne pour l'équilibre liquide-vapeur et pour les températures T_1 et T_2 les pressions d'équilibre, ainsi que les enthalpies et entropies massiques dans le tableau suivant. Calculer la création d'entropie massique lors de l'opération de laminage.

	P (bar)	h_l (kJ.kg^{-1})	h_v (kJ.kg^{-1})	s_l ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	s_v ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
T_2	0,8	387	556	4,061	4,776
T_1	7,7	448	586	4,286	4,743

- Reprendre la question précédente sachant que la capacité thermique massique du liquide vaut $c_l=0,92 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et que la chaleur latente de vaporisation vaut $\ell_{vap}(T_2)=168 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Exercice de thermodynamique 20 Détente adiabatique de vapeur

On considère un récipient adiabatique contenant une masse donnée de vapeur d'eau saturante (à la limite de liquéfaction), à la température T et à la pression P . Ces valeurs sont suffisamment éloignées du point critique pour pouvoir faire les trois approximations suivantes :

- le volume massique de l'eau liquide est négligeable devant celui de la vapeur saturante ;
- la vapeur d'eau est peu dense et a un comportement de gaz parfait
- le chaleur latente de vaporisation de l'eau se met sous la forme $L(T) = A - BT$ (approximation de Regnault)

Données pour l'eau : $A=3,08.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$; $B=2,14.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\gamma=1,3$; $c_{liq}=4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $M=18 \text{ g.mol}^{-1}$.

- On augmente légèrement le volume du récipient pour faire subir à cette vapeur une petite détente adiabatique quasi statique. Montrer que si T est inférieure à une certaine valeur T_c à déterminer, une partie de la vapeur va se liquéfier. Déterminer numériquement T_c .
- Citer un exemple de la vie courante où une telle formation de brouillard par détente est observée.
- On part d'un échantillon d'eau sous forme de vapeur saturante à la température $T_1=500$ K. Dans un système {piston+cylindre} calorifugé, on lui fait subir une détente adiabatique quasi statique qui l'amène jusqu'à la température $T_2=400$ K. Déterminer la fraction d'eau liquéfiée durant cette opération.

Exercice de thermodynamique 21 Réfrigérateur à fréon

Le fluide décrivant le cycle est du fréon, il subit quatre évolutions successives :

- $A \rightarrow B$: le fluide initialement dans l'état A ($T_A = 303$ K, $P_A = 7,5$ bars) de liquide saturé subit une détente de Joule-Thomson jusqu'à un état B diphasé ($T_B = 263$ K, $P_B = 2,2$ bars) ;

- $B \rightarrow M$: le fluide est partiellement vaporisé dans l'évaporateur ($x_M=0,98$), à pression et température constante, en recevant un transfert thermique de la source froide à $T_F = 268$ K (le contenu du réfrigérateur);
 - $M \rightarrow N$: compression adiabatique, le fluide se réchauffe jusqu'à $T_N = T_A = 303$ K. N état de vapeur saturante;
 - $N \rightarrow A$: dans le condenseur, le fluide se condense totalement jusqu'à l'état A en fournissant un transfert thermique à la source chaude dont la température $T_C = 298$ K est inférieure à la température du fréon, $T_A = T_N = 303$ K. La source chaude est constituée de l'air de la pièce où est placé le réfrigérateur.
1. Tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, v).
 2. On donne les enthalpies massiques de vaporisation aux deux températures utiles : $\ell_{263} = 159$ kJ.kg⁻¹ et $\ell_{303} = 139$ kJ.kg⁻¹ et la capacité thermique massique du fréon liquide $c = 0,96$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹ supposée indépendante de la température. Calculer le titre massique en vapeur x_B et la variation d'entropie massique Δs_{AB} .
 3. Calculer l'efficacité de cette machine frigorifique ditherme et la comparer à l'efficacité de Carnot correspondante.

Exercice de thermodynamique 22 pression de fusion

En appliquant la formule de Clapeyron, calculer la pression de fusion de l'eau à -1°C. Peut-on provoquer la fusion d'une plaque de verglas en marchant dessus ?

Données : pression de fusion à 0°C : 1 bar ; chaleur latente de fusion à 0°C : $\ell_f = 335$ kJ.kg⁻¹ ; masse volumique de la glace : $\rho_s = 0,92$ g.cm⁻³, de l'eau liquide : $\rho_l = 1$ g.cm⁻³.

Exercice de thermodynamique 23 Condition de stabilité d'un équilibre thermodynamique

On considère un système thermodynamique fermé monophasé en contact avec un thermostat à la température T_0 . La pression extérieure est constante et vaut P_0 .

1. Quel est le potentiel thermodynamique approprié ?
2. Montrer qu'une condition nécessaire de l'équilibre correspond à $P = P_0$.
3. En déduire que l'équilibre est stable si le coefficient de compressibilité isotherme du système, dont on rappellera l'expression est positif.

Exercice de thermodynamique 24 Cycle de Carnot et relation de Clapeyron

On se propose de retrouver la relation de Clapeyron en faisant parcourir un cycle de Carnot à un système fluide, à l'intérieur de la courbe de saturation.

1. Rappeler de quelles transformations est constitué un cycle de Carnot de moteur ditherme. Que est son rendement théorique ?
2. Tracer ce cycle dans un diagramme (P, v), pour deux isothermes T et $T - dT$ ($dT > 0$). On fera figurer la courbe de saturation sur le diagramme. Pour la température T , les états initial et final sont sur la courbe de saturation.
3. On s'intéresse à l'unité de masse fluide décrivant ce cycle. Calculer le rendement théorique r de ce moteur. Montrer en utilisant le diagramme tracé à la question précédente que ce rendement peut se mettre sous la forme :

$$r = \frac{v_V - v_L}{\ell_{vap}(T)} dP_{sat}.$$

En déduire la relation de Clapeyron pour l'équilibre liquide-vapeur.

Exercice de thermodynamique 25 Surfusion et croissance cristalline

Le phénomène de surfusion correspond à l'existence d'un corps pur à l'état liquide dans des conditions expérimentales où il devrait se trouver à l'état solide. Plus généralement, on parle de retard au changement d'état. Cet état métastable cesse quand le système est perturbé : choc, impureté, introduction d'un germe cristallin solide de taille suffisante. On se propose d'expliquer comment la croissance d'un germe cristallin peut entraîner la cessation de l'état surfondu.

Un système fermé est constitué d'une phase liquide pure surfondu et d'un cristal du même corps pur, sphérique et de rayon r variable. La température T est maintenue constante ainsi que la pression $P = P_0$. On suppose les volumes massiques de la phase solide et de la phase liquide égaux.

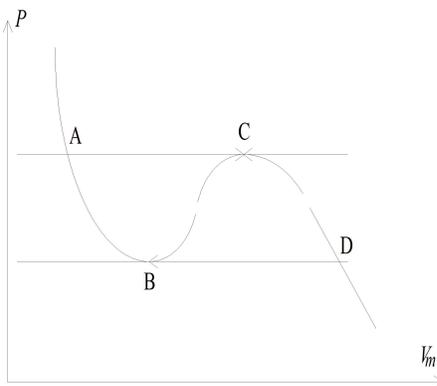
1. Justifier que l'enthalpie libre est un potentiel thermodynamique du système.
2. Soient μ_L et μ_S les enthalpies libres volumiques des phases liquide et solide pour la température considérée. Donner le signe de $\mu_L - \mu_S$ correspondant à l'hypothèse de surfusion.
3. Afin d'interpréter la métastabilité de l'état liquide, on associe à la surface de séparation entre les deux phases une enthalpie libre surfacique A . Ce terme prend en compte l'énergie nécessaire pour créer les défauts cristallins imposés par l'existence de cette interface. Exprimer l'enthalpie libre du système en fonction de A, r, μ_L, μ_S et V le volume total du système.
4. Tracer G en fonction de r .
5. Discuter de l'évolution du système en fonction de la taille initiale du germe cristallin. On fera apparaître un rayon critique r_C pour discuter.

Exercice de thermodynamique 26 Équilibre liquide vapeur pour un fluide de Van der Waals

On rappelle que l'enthalpie libre G est un potentiel thermodynamique pour une transformation isotherme et isobare. On peut déduire de cette propriété qu'un état d'équilibre thermodynamique stable présente nécessairement un coefficient de compressibilité isotherme positif :

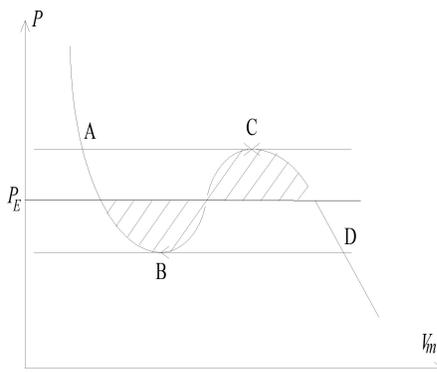
$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T > 0$$

1. Pour une température inférieure à la température critique T_C , sur la diagramme de Clapeyron les isothermes $P = f(V_m)$ ont l'allure suivante :



Pour une valeur de P comprise entre P_B et P_C , combien existe-t-il de valeurs possibles du volume molaire ? Quels sont les états stables ? L'état le plus dense décrit une phase liquide, le moins dense une phase vapeur.

- Rappeler la différentielle de l'enthalpie libre. Construire les graphes $G_m(P)$ (c'est à dire μ) pour les portions AB , BC et CD de l'isotherme $ABCD$. On notera E le point où les arcs correspondant aux évolutions AB et CD se coupent, puis on tracera l'arc associé aux états instables en pointillés.
- Justifier que l'état le plus stable est l'état le plus condensé si $P > P_E$ et l'état le moins condensé si $P < P_E$. Tracer alors la courbe $G_m(P)$ correspondant aux états stables.
- Que se passe-t-il au point E ? Représenter alors l'isotherme effective prenant en compte le palier associé à la transition liquide-vapeur.
- Montrer que la pression au point E est caractérisée par l'égalité des aires hachurées sur la courbe, ce qui constitue une construction géométrique du palier.



- Lorsqu'on détend à température constante un liquide, on constate parfois qu'il reste liquide dans des conditions où il devrait être gazeux (retard à la vaporisation). L'état est toutefois métastable. Quel arc du graphe rend compte d'un tel état? Même question pour un retard à la liquéfaction.

Exercice de thermodynamique 27 Importance des différents termes

Pour une turbine à gaz (de capacité thermique massique à pression constante $c_p \approx 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), où la température chute de 20°C entre l'entrée et la sortie, où la vitesse des gaz est $v \approx 10 \text{ m.s}^{-1}$ et la différence d'altitude entre l'entrée et la sortie de l'ordre du mètre, évaluer l'importance des différents termes intervenant dans le premier principe en écoulement permanent et conclure.

Exercice de thermodynamique 28 Installation frigorifique

On modélise le comportement thermodynamique du fluide dans une machine frigorifique à fluide diphasé par la succession de transformations suivantes :

- compression adiabatique réversible en phase gazeuse du point A au point B . Au point A le fluide est à l'état de vapeur saturante
- refroidissement isobare de la vapeur du point B au point C . Au point C le fluide est à l'état de vapeur saturante
- liquéfaction totale isobare de la vapeur du point C au point D . Au point D le fluide est à l'état de liquide saturant
- détente adiabatique irréversible du fluide que l'on peut modéliser par une détente isenthalpique entre le point D et le point E (état d'équilibre liquide-vapeur)
- vaporisation totale du fluide du point E au point A .

On donne les enthalpies massiques du fluide aux points A , B et D :

$$h_A=1167 \text{ kJ.kg}^{-1}, h_B=1355 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ et } h_D=30 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

1. Représenter le cycle en diagramme de Clapeyron, l'orienter et calculer les transferts thermiques massiques q_C et q_F reçus par le fluide, au cours du cycle de la part de la source chaude et de la source froide.
2. Estimer le coefficient d'efficacité η de la machine frigorifique.
3. La phase gazeuse de capacité thermique massique à pression constante c_p , peut être assimilée à un gaz parfait. On note T_B la température du fluide au point B et T_C la température du fluide au point C . Exprimer littéralement l'enthalpie massique de vaporisation $\ell_v(T_C)$ du fluide à la température T_C en fonction des données.
4. Le titre massique en vapeur x est défini comme le rapport de la masse de vapeur sur la masse totale du fluide. Calculer numériquement le titre massique en vapeur x_E au point E sachant que la chaleur latente de vaporisation du fluide à la température T_A est $\ell_v(T_A)=1293 \text{ kJ.kg}^{-1}$.
5. On utilise cette installation frigorifique pour maintenir constante la température d'une chambre froide à laquelle il faut enlever $5\,000 \text{ J}$ par heure. Sachant que la machine fonctionne en régime stationnaire, calculer le débit massique D_m du fluide frigorifique.

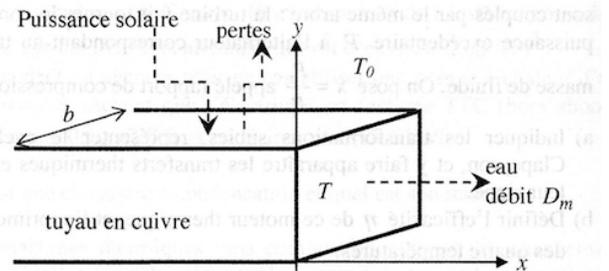
Exercice de thermodynamique 29 Chauffe-eau solaire



Un chauffe-eau solaire de toit à utilisation domestique est modélisé par un tuyau d'axe Ox à section rectangulaire en cuivre de largeur b peint en noir (pour absorber le rayonnement) reposant sur sa face inférieure sur un isolant thermique et exposé au soleil par sa face supérieure. Les faces latérales verticales sont également calorifugées et ne reçoivent aucun rayonnement. Le tuyau est parcouru par un courant d'eau permanent dans la direction de l'axe x et de débit massique D_m . La capacité thermique de l'eau est $c_p = 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La lumière solaire est entièrement absorbée par le tuyau. L'éclairement du tuyau (puissance solaire reçue par unité de surface de tuyau) est notée E . On étudie le régime permanent d'écoulement une fois celui-ci établi. Le régime transitoire de montée en température n'est pas abordé : la température ne dépend donc pas du temps. On supposera que $T = T(x)$.

Le cuivre étant un excellent conducteur thermique, on peut supposer que tout le métal, y compris sa face noircie est à la même température $T(x)$ que l'eau dans le tuyau à la même abscisse x . Les seuls transferts thermiques envisagés se font selon y (pas de diffusion thermique dans le sens x de la convection, ni dans l'eau ni dans le cuivre). Si l'air extérieur à la température T_0 est plus froid que le tuyau, il y a inévitablement des pertes thermiques vers l'atmosphère (ou un gain si l'air extérieur est plus chaud).



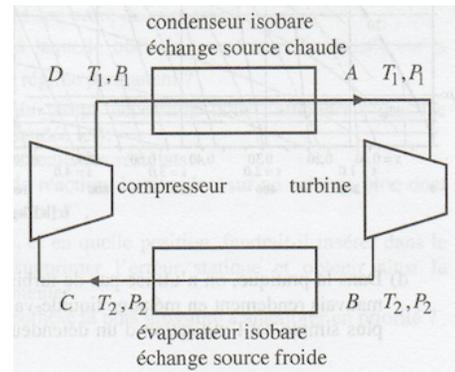
1. Préciser l'origine physique de ces pertes, et justifier qu'elles peuvent s'écrire par unité de longueur sous la forme $dP_{pertes} = \alpha b(T - T_0)dx$ où α est une constante dont l'expression n'est pas demandée.
2. Appliquer le premier principe en régime stationnaire à l'eau contenue entre les abscisses x et $x + dx$. On posera $\theta(x) = T(x) - T_0$. Quelle est l'équation vérifiée par $\theta(x)$?
3. Résoudre cette équation en supposant que l'eau entre en $x = 0$ à la température T_1 . On fera apparaître une dimension L caractéristique du problème. Le débit massique étant imposé par le cahier des charges, quelle longueur faut-il choisir pour optimiser le dispositif ? Pourquoi est-il préférable de placer l'ensemble sous une vitre transparente ?

4. A.N. : en été, avec la vitre, $T_0 = 50\text{ °C}$, $T_1 = 18\text{ °C}$, $b = 4\text{ cm}$, $D_m = 50\text{ kg/h}$, $E = 800\text{ W/m}^2$. Trouver la valeur de α grâce à l'expérience préliminaire suivante : sans aucun débit d'eau, on attend le régime permanent et on trouve une température constante $T = 86\text{ °C}$.
Evaluer ensuite la température limite que peut atteindre l'eau avec le débit D_m et la longueur à donner au tuyau. Donner enfin l'allure du graphe $T(x)$.
5. En hiver l'inclinaison des rayons et la nébulosité diminuent l'éclairement à $E = 450\text{ W/m}^2$. La température sous la vitre prend la valeur $T_0 = 14\text{ °C}$ et l'eau est plus froide à l'entrée : $T_1 = 8\text{ °C}$. Calculer la température de sortie pour la même longueur de tuyau et le même débit. Le chauffe-eau solaire conserve-t-il un intérêt ?

Exercice de thermodynamique 30 Réfrigérateur à ammoniac

Pour optimiser l'efficacité d'une machine frigorifique, il faut s'approcher du cycle de Carnot théorique, constitué de deux isothermes et de deux adiabatiques. De plus pour des transferts thermiques importants, sans utiliser de trop grandes quantités de fluide, on utilise des changements d'état. On suppose donc que l'ammoniac décrit l'intégralité du palier de changement d'état à T_1 ; le fonctionnement se fait en circuit fermé et en régime permanent avec une circulation d'ammoniac pur au débit massique D_m .

On considère l'installation ci-contre. Dans le condenseur et l'évaporateur isobares, le fluide est diphasé, donc la température reste aussi constante. De façon classique, le travail récupéré à la turbine est fourni au compresseur ce qui limite la dépense de ce dernier.



- Placer dans un diagramme (T, s) , la courbe de saturation et tracer le cycle de Carnot théorique $ABCD$ que décrirait le fluide.
- On fixe d'abord les températures à $T_1 = 40\text{ °C}$ et $T_2 = -20\text{ °C}$. Justifier ces valeurs si la source chaude est à $T_C = 30\text{ °C}$ et l'intérieur du "réfrigérateur" à $T_F = -5\text{ °C}$. Cela modifie-t-il l'étude théorique ?
- On donne ci-dessous le diagramme $(\ln P, h)$ encore appelé diagramme de Mollier des frigoristes, pour l'ammoniac. Les isentropiques (notées s) sont en bleu, les isochores en vert et les isothermes en rouge. Les courbes suivies par le fluide dans ses transformations seront assimilées à des portions de droites et les valeurs numériques entre deux courbes données seront interpolées linéairement.
Mesurer les pressions P_1 et P_2 puis tracer le cycle de Carnot $ABCD$. Calculer l'efficacité de Carnot (préciser les températures) et commenter le résultat.
- Dans la pratique, on n'utilise pas de turbine de détente adiabatique : elles ont un mauvais rendement en mélange liquide-vapeur, et sont complexes et chères. Bien plus simple est l'utilisation d'un détendeur calorifugé simple, sans pièce mobile (souvent un simple rétrécissement). Montrer que ce détendeur est isenthalpique et tracer la nouvelle portion AB' sur le diagramme.
- On ne comprime pas non plus de mélange diphasé du point C au point D , ceci risquerait d'endommager le compresseur. On préfère décrire l'intégralité du palier d'évaporation à T_2 jusqu'au point C' avant de comprimer la vapeur sèche de façon adiabatique réversible jusqu'à P_1 . Tracer le nouveau cycle $AB'C'D'A$ décrit par l'ammoniac. Quelle est la température maximale atteinte et quel problème cela peut-il poser ?
- Sachant que l'on veut extraire $1,0\text{ kW}$ thermique de la source froide, calculer le débit massique du fluide, la puissance électrique à fournir au compresseur dont le moteur électrique a un rendement $r = 0,9$, le débit

volumique qu'il aspire, ainsi que la puissance thermique que doit absorber la source chaude. Calculer l'efficacité du cycle réfrigérateur.

