Thermodynamique et mécanique des fluides – Chapitre 5

Diagrammes d'état des fluides réels purs – TD

Exercice 1 : Transformations d'un gaz parfait dans un diagramme entropique

On souhaite représenter les transformations d'un gaz parfait constitué d'un corps pur dans un diagramme entropique (T, s) en l'absence de changement d'état.

1. Déterminer l'allure de la courbe représentant une transformation isotherme dans ce diagramme.
2. Déterminer l'allure de la courbe représentant une transformation isentropique dans ce diagramme.
3. Déterminer l'allure de la courbe représentant une transformation isenthalpique dans ce diagramme.
4. Déterminer l'allure de la courbe représentant une transformation isochore dans ce diagramme.
5. Déterminer l'allure de la courbe représentant une transformation isobare dans ce diagramme.

Exercice 2 : Composition d'un mélange diphasique de R-134

Dans une installation frigorifique, on détend du liquide réfrigérant R-134 de façon adiabatique et isenthalpique de la pression $P_1 = 12\,\text{bar}$ jusqu'à la pression $P_2 = 2\,\text{bar}$. L'état final contient alors un mélange diphasique liquide-gaz, dont le titre massique en gaz est x_G.

On donne ci-dessous les enthalpies et entropies massiques des phases liquides et gazeuses pour le fluide réfrigérant R-134 :

	h_L $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	h_G $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	s_L $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	s_G $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
$P_1 = 12\,\text{bar}$	117,8	273,9	0,4244	0,9130
$P_2 = 2\,\text{bar}$	38,4	244,5	0,1546	0,9377

1. Déterminer l'enthalpie massique dans l'état final.
2. Établir la règle des moments relatif à l'enthalpie massique pour exprimer x_G, puis calculer sa valeur.
3. Calculer l'entropie massique créée lors de cette détente.

Exercice 3 : Mélange d'eau et de glace

Dans une enceinte calorifugée permettant de travailler en condition monobare, on mélange une masse $m_1 = 500\,\text{g}$ d'eau liquide à la température $T_1 = 15°\text{C}$ et une masse m_2 de glace à la température $T_2 = -5{,}0°\text{C}$, puis on attend que le système atteigne un état d'équilibre.

On rappelle que la variation d'entropie d'une phase condensée incompressible et indilatable dont la température passe de T_i à T_f s'exprime :

$$\Delta S = m\,c\ln\left(\frac{T_\text{f}}{T_\text{i}}\right)$$

avec m la masse de la phase condensée et c sa capacité thermique massique.

On donne :

- la capacité thermique massique de l'eau : $c_\text{e} = 4{,}18\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- la capacité thermique massique de la glace : $c_\text{g} = 2{,}06\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- l'enthalpie massique de fusion de l'eau sous 1 bar : $\Delta_\text{fus}h = 330\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

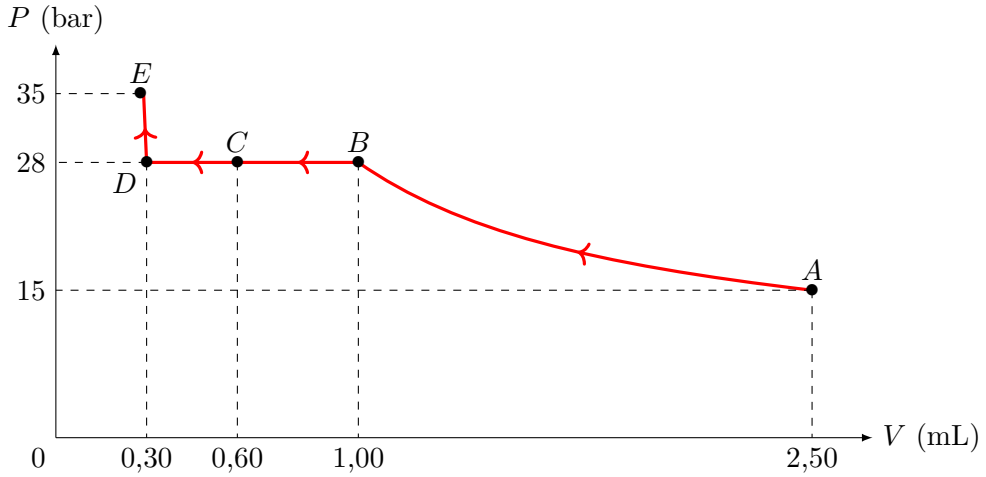
1. Déterminer la masse maximale de glace pour laquelle l'état final ne contient que de l'eau liquide.
2. Déterminer la masse minimale de glace pour laquelle l'état final ne contient que de la glace solide.

On introduit en pratique une masse de glace $m_2 = 200\,\text{g}$.

3. Déterminer la composition finale du système.
4. Calculer l'entropie créée.

Exercice 4 : Équilibre liquide-gaz de l'hexafluorure de soufre

Une éprouvette graduée contenant une masse $m_0 = 0{,}225\,\text{g}$ d'hexafluorure de soufre SF_6 est en contact avec un thermostat à la température $T_0 = 308\,\text{K}$. Elle est fermée à l'aide d'un piston, que l'on déplace lentement afin de comprimer le SF_6 de façon réversible et isotherme. On représente ci-dessous l'évolution de la pression P dans l'éprouvette en fonction du volume V occupé par le SF_6.



On suppose que l'hexafluorure de soufre gazeux peut être assimilé à un gaz parfait, et on donne :

- l'enthalpie massique de vaporisation du SF_6 : $\Delta_{\text{vap}}h = 67{,}8\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- la masse molaire du SF_6 : $M = 146\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

1. Préciser l'état physique du SF_6 dans les différents états A, B, C, D et E.
2. Quelle est la pression de vapeur saturante du SF_6 à la température $T_0 = 308\,\text{K}$?
3. Calculer le titre massique en gaz x_G dans l'état C.
4. Calculer le travail reçu par le SF_6 entre les états A et C.
5. Calculer le transfert thermique reçu par le SF_6 entre les états A et C.
6. En déduire la variation d'énergie interne du SF_6 entre les états A et C.
7. Calculer la variation d'entropie du SF_6 entre les états A et C.

Exercice 5 : Stockage de l'ammoniac

L'ammoniac NH_3 est l'une des molécules les plus synthétisées au monde. Il est utilisé à la fois comme engrais et pour ses propriétés de réfrigérant.

On étudie le stockage d'ammoniac pur dans une citerne de volume $V_{\text{cit}} = 40\,\text{m}^3$. À la température $T = 20°\text{C}$, la masse volumique de sa phase liquide vaut $\rho_L = 0{,}61\,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, et sa pression de vapeur saturante vaut $P_{\text{sat}} = 8{,}6\,\text{bar}$. On considère que sa phase gazeuse peut être modélisée comme un gaz parfait de masse molaire $M = 17{,}0\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Le point critique de l'ammoniac correspond à une température $T_C = 132°\text{C}$ et une masse volumique $\rho_C = 0{,}26\,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1. Calculer les volumes massiques v_L de la phase liquide et v_G de la phase gazeuse de l'ammoniac pour un mélange diphasique liquide-gaz à la température $T = 20°\text{C}$.
2. À l'aide d'un diagramme de Clapeyron, expliquer pourquoi le stockage d'un fluide à l'équilibre liquide-gaz dans de bonnes conditions de sécurité nécessite que le volume massique du fluide soit supérieur au volume massique v_C de son point critique dans le cas où il existe un risque d'échauffement accidentel.
3. En déduire la masse maximale d'ammoniac qui peut être stockée dans cette citerne.
4. Calculer la masse limite d'ammoniac dans la citerne pour que celui-ci se trouve uniquement sous forme gazeuse.
5. Si la citerne contient au total $2\,000\,\text{kg}$ d'ammoniac, quelle serait la masse de la phase liquide ?

Exercice 6 : Étape motrice d'un cycle de machine à vapeur

On s'intéresse à l'étape motrice d'un cycle de machine à vapeur. Elle consiste en une détente adiabatique et réversible d'un état A vers un état B pour de l'eau contenue dans un cylindre de rayon $R = 10\,\text{cm}$ fermé par un piston coulissant.

- Dans l'état initial A, l'eau est sous la forme d'une vapeur saturante à la pression $P_A = 20\,\text{bar}$ et à la température $T_A = 485\,\text{K}$.
- Dans l'état final B, l'eau est sous la forme d'un équilibre liquide-vapeur à la pression $P_B = 1{,}0\,\text{bar}$ et à la température $T_B = 373\,\text{K}$.

On donne ci-dessous les valeurs des volumes, enthalpies et entropies massiques dans les conditions de pression et de température (P_A, T_A) et (P_B, T_B) :

- pour l'eau liquide :

	v_L $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	h_L $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	s_L $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
(P_A, T_A)	$1{,}18.10^{-3}$	909	2,45
(P_B, T_B)	$1{,}04.10^{-3}$	418	1,30

- pour la vapeur d'eau :

	v_V $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	h_V $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	s_V $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
(P_A, T_A)	0,0998	2801	6,35
(P_B, T_B)	1,70	2676	7,36

1. Représenter schématiquement l'emplacement des états A et B dans un diagramme de Clapeyron, ainsi que les isothermes T_A et T_B.

2. Quel est le titre massique en vapeur dans l'état A ?

3. Calculer le titre massique en vapeur dans l'état B.

4. Calculer la variation d'enthalpie massique lors de la détente.

5. Sachant que le piston coulisse sur une distance $d = 50\,\text{cm}$ lors de la détente, calculer la masse d'eau contenue dans le cylindre.

6. En déduire la variation d'enthalpie du système lors de cette étape.