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.

Correction :

1. Une transformation isotherme correspond à $T = \text{cste}$, elle est donc représentée par une droite horizontale.

2. Une transformation isentropique correspond à $S = \text{cste}$, d'où : $s = \dfrac{S}{m} = \text{cste}$, elle est donc représentée par une droite verticale.

3. Une transformation isenthalpique correspond à $H = \text{cste}$, or l'enthalpie d'un gaz parfait ne dépend que de sa température d'après la seconde loi de Joule. La transformation correspond alors à une transformation isotherme, elle est donc représentée par une droite horizontale.

4. Une transformation isochore correspond à $V = \text{cste}$, d'où : $v = \dfrac{V}{m} = \text{cste}$. La première identité thermodynamique donne sous forme massique : $\mathrm{d}u = T\,\mathrm{d}s - P\,\mathrm{d}v$, avec $\mathrm{d}v = 0$ et $\mathrm{d}u = c_\mathrm{V}\,\mathrm{d}T$ pour un gaz parfait, soit : $c_\mathrm{V}\,\mathrm{d}T = T\,\mathrm{d}s$, d'où : $\dfrac{\mathrm{d}T}{T} = \dfrac{\mathrm{d}s}{c_\mathrm{V}}$. On obtient en intégrant : $\ln T = \dfrac{s}{c_\mathrm{V}} + \text{cste}$, d'où : $T = A\exp\left(\dfrac{s}{c_\mathrm{V}}\right)$, avec A une constante. La transformation est donc représentée par une exponentielle.

5. Une transformation isobare correspond à $P = \text{cste}$. La seconde identité thermodynamique donne sous forme massique : $\mathrm{d}h = T\,\mathrm{d}s + v\,\mathrm{d}P$, avec $\mathrm{d}P = 0$ et $\mathrm{d}h = c_\mathrm{P}\,\mathrm{d}T$ pour un gaz parfait, soit : $c_\mathrm{P}\,\mathrm{d}T = T\,\mathrm{d}s$, d'où : $\dfrac{\mathrm{d}T}{T} = \dfrac{\mathrm{d}s}{c_\mathrm{P}}$. On obtient en intégrant : $\ln T = \dfrac{s}{c_\mathrm{P}} + \text{cste}$, d'où : $T = A\exp\left(\dfrac{s}{c_\mathrm{P}}\right)$, avec A une constante. La transformation est donc représentée par une exponentielle, de croissance plus faible que celle d'une transformation isochore comme $c_\mathrm{P} > c_\mathrm{V}$.

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 $(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}})$	h_G $(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}})$	s_L $(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}})$	s_G $(\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}})$
$P_1 = 12\,\text{bar}$	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.

Correction :

1. Comme la transformation est isenthalpique, l'enthalpie massique se conserve entre l'état initial (qui ne contient que du liquide à la pression P_1) et l'état final : $h_2 = h_1 = h_{\mathrm{L},P_1} = 117{,}8\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$.

2. L'enthalpie total de l'équilibre liquide-gaz dans l'état final s'exprime : $H_2 = m_\mathrm{L}\,h_{\mathrm{L},P_2} + m_\mathrm{G}\,h_{\mathrm{G},P_2} = m\,x_\mathrm{L}\,h_{\mathrm{L},P_2} + m\,x_\mathrm{G}\,h_{\mathrm{G},P_2} = m\,(1-x_\mathrm{G})\,h_{\mathrm{L},P_2} + m\,x_\mathrm{G}\,h_{\mathrm{G},P_2}$, avec $H_2 = h_2\,m$, d'où on en déduit la règle des moments : $x_\mathrm{G} = \dfrac{h_2 - h_{\mathrm{L},P_2}}{h_{\mathrm{G},P_2} - h_{\mathrm{L},P_2}} = 0{,}385$.

3. Comme la détente est adiabatique, l'entropie massique échangée est nulle, et le seconde principe de la thermodynamique sous forme massique donne : $s_\mathrm{créée} = \Delta s = s_2 - s_1$, avec $s_1 = s_{\mathrm{L},P_1}$ l'entropie massique dans l'état initial, et $s_2 = x_\mathrm{L}\,s_{\mathrm{L},P_2} + x_\mathrm{G}\,s_{\mathrm{G},P_2} = (1-x_\mathrm{G})\,s_{\mathrm{L},P_2} + x_\mathrm{G}\,s_{\mathrm{G},P_2}$ l'entropie massique dans l'état final, d'où : $s_\mathrm{créée} = (1-x_\mathrm{G})\,s_{\mathrm{L},P_2} + x_\mathrm{G}\,s_{\mathrm{G},P_2} - s_{\mathrm{L},P_1} = 32\,\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$.

Exercice 3 : Mélange d'eau et de glace

Dans une enceinte calorifugée permettant de travailler en condition monobare, on mélange une masse $m_1 = 500\,\mathrm{g}$ d'eau liquide à la température $T_1 = 15°\mathrm{C}$ et une masse m_2 de glace à la température $T_2 = -5{,}0°\mathrm{C}$, 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 :

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

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

On donne :

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

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 $m_2 = 200\,\mathrm{g}$.

3. Déterminer la composition finale du système.

4. Calculer l'entropie créée.

Correction :

1. Comme la transformation est monobare, le premier principe appliqué au système permet d'exprimer la variation d'enthalpie : $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = Q$, avec :

- $\Delta H_1 = m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1)$ comme l'eau passe de la température T_1 à $T_0 = 0°\mathrm{C}$;
- $\Delta H_2 = m_2\,c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2) + m_2\,\Delta_\mathrm{fus}h$ comme la glace passe de la température T_2 à T_0 puis se liquéfie ;
- $Q = 0$ comme l'enceinte est calorifugée.

On obtient : $m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1) + m_2\,c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2) + m_2\,\Delta_\mathrm{fus}h = 0$, d'où : $m_2 = -\dfrac{m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1)}{c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2) + \Delta_\mathrm{fus}h} = 92\,\mathrm{g}$.

2. Le raisonnement est identique, avec cette fois :

- $\Delta H_1 = m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1) + m_1\,(-\Delta_\mathrm{fus}h)$ comme l'eau passe de la température T_1 à $T_0 = 0°\mathrm{C}$ puis se solidifie ;
- $\Delta H_2 = m_2\,c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2)$ comme la glace passe de la température T_2 à T_0.

On obtient : $m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1) - m_1\,\Delta_\mathrm{fus}h + m_2\,c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2) = 0$, d'où : $m_2 = -\dfrac{m_1\,c_\mathrm{e}\,(T_0 - T_1) - m_1\,\Delta_\mathrm{fus}h}{c_\mathrm{g}\,(T_0 - T_2)} = 19\,\mathrm{kg}$.

3. Comme $92\,\text{g} < m_2 < 19\,\text{kg}$, on obtient un mélange diphasique d'eau et de glace à la température $T_0 = 0°\text{C}$, d'où :

- $\Delta H_1 = m_1\, c_\text{e}\,(T_0 - T_1)$ comme l'eau placée dans l'enceinte reste sous forme liquide ;
- $\Delta H_2 = m_2\, c_\text{g}\,(T_0 - T_2) + m_2'\,\Delta_\text{fus}h$ avec m_2' la masse de glace qui se liquéfie dans l'état final.

On obtient : $m_1\, c_\text{e}\,(T_0 - T_1) + m_2\, c_\text{g}\,(T_0 - T_2) + m_2'\,\Delta_\text{fus}h = 0$, d'où : $m_2' = -\dfrac{m_1\, c_\text{e}\,(T_0 - T_1) + m_2\, c_\text{g}\,(T_0 - T_2)}{\Delta_\text{fus}h} = 89\,\text{g}$.

L'état final contient donc $(m_1 + m_2') = 589\,\text{g}$ d'eau, et $(m_2 - m_2') = 111\,\text{g}$ de glace.

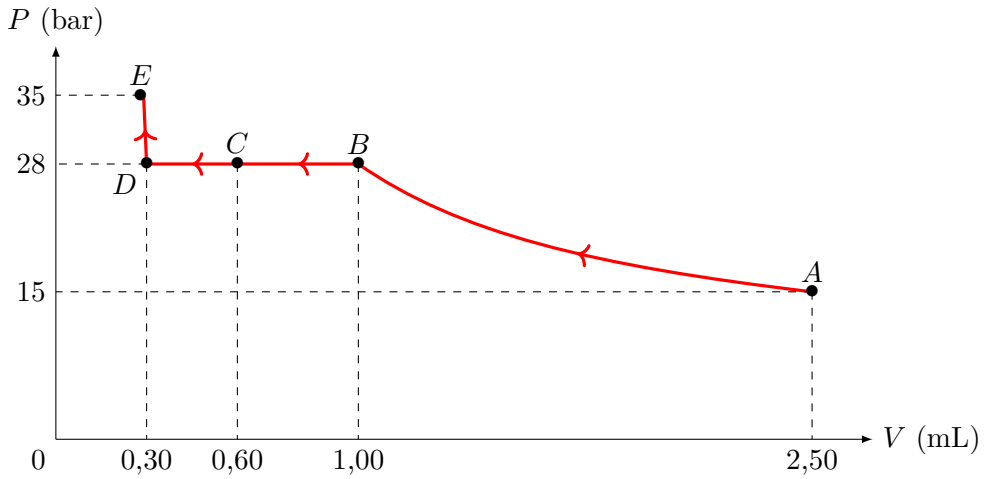
4. Comme l'enceinte est calorifugée, l'entropie échangée avec le milieu extérieur est nulle, le second principe donne donc : $S_\text{créée} = \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$, avec :

- $\Delta S_1 = m_1\, c_\text{e} \ln\left(\dfrac{T_0}{T_1}\right)$ pour l'eau ;
- $\Delta S_2 = m_2\, c_\text{g} \ln\left(\dfrac{T_0}{T_2}\right) + \dfrac{m_2'\,\Delta_\text{fus}h}{T_0}$ pour la glace.

On obtient : $S_\text{créée} = m_1\, c_\text{e} \ln\left(\dfrac{T_0}{T_1}\right) + m_2\, c_\text{g} \ln\left(\dfrac{T_0}{T_2}\right) + \dfrac{m_2'\,\Delta_\text{fus}h}{T_0} = 3{,}1\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$.

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.

Correction :

1. Comme le SF_6 est transformé à température constante, on en déduit par analogie avec une isotherme dans le diagramme de Clapeyron :

- l'état A correspond à une phase gazeuse ;
- l'état B correspond à une vapeur saturante ;
- l'état C correspond à un équilibre liquide-gaz ;
- l'état D correspond à un liquide saturant ;
- l'état E correspond à une phase liquide.

2. La pression de vapeur saturante à la température $T_0 = 308\,\text{K}$ correspond au palier de l'équilibre liquide-vapeur, soit : $P_{\text{sat}} = 28\,\text{bar}$.

3. En utilisant la règle des moments, on en déduit le titre massique en gaz dans l'état C : $x_{\text{G}} = \dfrac{V_C - V_D}{V_B - V_D} = 0{,}43$.

4. Le travail reçu entre les états A et C est : $W_{A\to C} = W_{A\to B} + W_{B\to C}$, avec :

- pour la compression quasi-statique et isotherme d'un gaz parfait : $W_{A\to B} = -\displaystyle\int_A^B P\,\mathrm{d}V = -\int_A^B \frac{n\,R\,T_0}{V}\,\mathrm{d}V = -\frac{m_0\,R\,T_0}{M}\int_A^B \frac{\mathrm{d}V}{V} = -\frac{m_0\,R\,T_0}{M}\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$;
- pour la liquéfaction à la pression P_{sat} : $W_{B\to C} = -\displaystyle\int_B^C P_{\text{sat}}\,\mathrm{d}V = -P_{\text{sat}}\,(V_C - V_B)$;

d'où finalement : $W_{A\to C} = -\dfrac{m_0\,R\,T_0}{M}\ln\left(\dfrac{V_B}{V_A}\right) - P_{\text{sat}}\,(V_C - V_B) = 4{,}7\,\text{J}$.

5. Le transfert thermique reçu entre les états A et C est : $Q_{A\to C} = Q_{A\to B} + Q_{B\to C}$, avec :

- pour la compression quasi-statique et isotherme d'un gaz parfait : $Q_{A\to B} = \Delta U_{A\to B} - W_{A\to B}$, avec $\Delta U_{A\to B} = 0$, soit : $Q_{A\to B} = \dfrac{m_0\,R\,T_0}{M}\ln\left(\dfrac{V_B}{V_A}\right)$;
- pour la liquéfaction à la pression P_{sat} : $Q_{B\to C} = m_{\text{L}}\left(-\Delta_{\text{vap}}h\right) = -m_0\,x_{\text{L}}\,\Delta_{\text{vap}}h = -m_0\,(1-x_{\text{G}})\,\Delta_{\text{vap}}h$;

d'où finalement : $Q_{A\to C} = \dfrac{m_0\,R\,T_0}{M}\ln\left(\dfrac{V_B}{V_A}\right) - m_0\,(1-x_{\text{G}})\,\Delta_{\text{vap}}h = -12{,}3\,\text{J}$.

6. On en déduit la variation d'énergie interne entre les états A et C : $\Delta U_{A\to C} = Q_{A\to C} + W_{A\to C} = -7{,}6\,\text{J}$.

7. La transformation étant réversible, l'entropie créée est nulle, et la variation d'entropie entre les états A et C est alors donnée par le second principe : $\Delta S_{A\to C} = S_{\text{éch},A\to C} = \dfrac{Q_{A\to C}}{T_0} = -4{,}0.10^{-2}\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$.

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 $\rho_{\text{L}} = 0{,}61\,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 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 $T_{\text{C}} = 132°\text{C}$ et une masse volumique $\rho_{\text{C}} = 0{,}26\,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

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 kg d'ammoniac, quelle serait la masse de la phase liquide ?

Correction :

1. Le volume massique v_L du liquide se déduit directement de la masse volumique : $v_\mathrm{L} = \dfrac{1}{\rho_\mathrm{L}} = 1{,}6.10^{-3}\,\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}}$.

Le volume massique v_G du gaz se déduit de l'équation des gaz parfaits : $v_\mathrm{G} = \dfrac{V}{m} = \dfrac{n\,R\,T}{m\,P} = \dfrac{R\,T}{M\,P}$, avec $P = P_\mathrm{sat}$ pour un mélange diphasé, d'où : $v_\mathrm{G} = \dfrac{R\,T}{M\,P_\mathrm{sat}} = 1{,}7.10^{-1}\,\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}}$.

2. On considère un fluide en équilibre diphasique, représenté par un point sur le diagramme de Clapeyron (P, v). Un échauffement accidentel du fluide, dans des conditions isochores puisque le volume de la citerne est constant, correspond à monter verticalement dans le diagramme.

- Si le volume massique est tel que $v < v_\mathrm{C}$, la phase gazeuse disparait lorsqu'on atteint la courbe d'ébullition, et il ne reste plus que la phase liquide. Au-delà, l'échauffement engendre une augmentation très importante de la pression, qui peut faire exploser la citerne.
- Si le volume massique est tel que $v > v_\mathrm{C}$, la phase liquide disparait lorsqu'on atteint la courbe de rosée, et il ne reste plus que la phase gazeuse. Au-delà, l'échauffement engendre une augmentation faible et progressive de la pression, qui ne présente pas de problème de sécurité.

3. Le volume massique doit vérifier $v > v_\mathrm{C}$, avec $v = \dfrac{V_\mathrm{cit}}{m}$ et $v_\mathrm{C} = \dfrac{1}{\rho_\mathrm{C}}$, soit : $\dfrac{V_\mathrm{cit}}{m} > \dfrac{1}{\rho_\mathrm{C}}$, d'où une masse maximale : $m_\mathrm{max} = V_\mathrm{cit}\,\rho_\mathrm{C} = 1{,}0.10^4\,\mathrm{kg}$.

4. L'ammoniac est uniquement sous forme gazeuse si $v > v_\mathrm{G}$, soit : $\dfrac{V_\mathrm{cit}}{m} > v_\mathrm{G}$, d'où une masse limite : $m_\mathrm{lim} = \dfrac{V_\mathrm{cit}}{v_\mathrm{G}} = 2{,}4.10^2\,\mathrm{kg}$.

5. On exprime le titre massique en liquide à l'aide de la règle des moments : $x_\mathrm{L} = \dfrac{v_\mathrm{G} - v}{v_\mathrm{G} - v_\mathrm{L}} = \dfrac{v_\mathrm{G} - \frac{V_\mathrm{cit}}{m}}{v_\mathrm{G} - v_\mathrm{L}}$, d'où on en déduit la masse de liquide : $m_\mathrm{L} = x_\mathrm{L}\,m = \dfrac{v_\mathrm{G}\,m - V_\mathrm{cit}}{v_\mathrm{G} - v_\mathrm{L}} = 1{,}8.10^3\,\mathrm{kg}$.

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 $R = 10\,\mathrm{cm}$ fermé par un piston coulissant.

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

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 $(\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}})$	h_L $(\mathrm{kJ \cdot kg^{-1}})$	s_L $(\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}})$
(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 $(\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}})$	h_V $(\mathrm{kJ \cdot kg^{-1}})$	s_V $(\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}})$
(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.

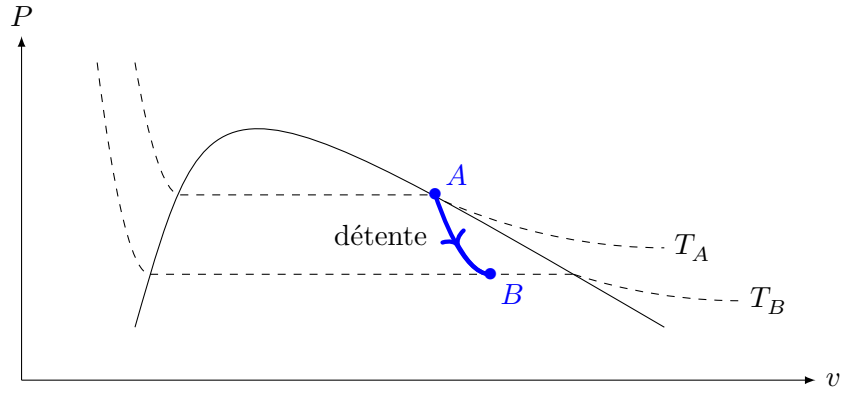
5. Sachant que le piston coulisse sur une distance $d = 50\,\text{cm}$ lors de la détente, calculer la masse d'eau contenue dans le cylindre.

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

Correction :

1. L'état A se situe sur la courbe de rosée, tandis que l'état B se situe sur un palier d'équilibre liquide-vapeur à une pression inférieure.

On peut représenter ces états dans un diagramme de Clapeyron :



2. Comme l'état A correspond à une vapeur saturante, il ne contient que de la vapeur d'eau, d'où un titre massique en vapeur : $x_{\text{V},A} = 1$.

3. La règle des moments appliquée à la température T_B permet d'exprimer le titre massique en vapeur : $x_{\text{V},B} = \dfrac{s_B - s_\text{L}(T_B)}{s_\text{V}(T_B) - s_\text{L}(T_B)}$, avec $s_B = s_A$ comme la détente est adiabatique réversible (c'est-à-dire isentropique), et $s_A = s_\text{V}(T_A)$ comme l'état A ne contient que de la vapeur d'eau.

On obtient donc : $x_{\text{V},B} = \dfrac{s_\text{V}(T_A) - s_\text{L}(T_B)}{s_\text{V}(T_B) - s_\text{L}(T_B)} = 0{,}833$.

4. La variation d'enthalpie massique lors de la détente est : $\Delta h = h_B - h_A$, avec :

- $h_A = h_\text{V}(T_A)$ comme l'état A ne contient que de la vapeur d'eau ;
- $h_B = x_{\text{V},B}\, h_\text{V}(T_B) + x_{\text{L},B}\, h_\text{L}(T_B) = x_{\text{V},B}\, h_\text{V}(T_B) + \big(1 - x_{\text{V},B}\big)\, h_\text{L}(T_B)$ comme l'état B contient un équilibre liquide-vapeur.

On obtient donc : $\Delta h = x_{\text{V},B}\, h_\text{V}(T_B) + \big(1 - x_{\text{V},B}\big)\, h_\text{L}(T_B) - h_\text{V}(T_A) = -501\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

5. La variation du volume massique lors de la détente peut s'exprimer de façon équivalente : $\Delta v = x_{\text{V},B}\, v_\text{V}(T_B) + \big(1 - x_{\text{V},B}\big)\, v_\text{L}(T_B) - v_\text{V}(T_A)$.

Comme le piston coulisse sur une distance d, la variation du volume du cylindre lors de la détente est : $\Delta V = \pi\, R^2\, d$, d'où on en déduit la masse d'eau contenue dans le cylindre : $m = \dfrac{\Delta V}{\Delta v} = \dfrac{\pi\, R^2\, d}{x_{\text{V},B}\, v_\text{V}(T_B) + \big(1 - x_{\text{V},B}\big)\, v_\text{L}(T_B) - v_\text{V}(T_A)} = 1{,}2.10^{-2}\,\text{kg}$.

6. La variation d'enthalpie du système lors de cette étape est : $\Delta H = m\,\Delta h = -6{,}0\,\text{kJ}$.