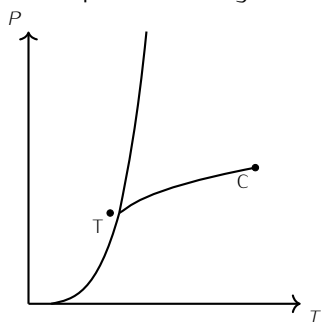


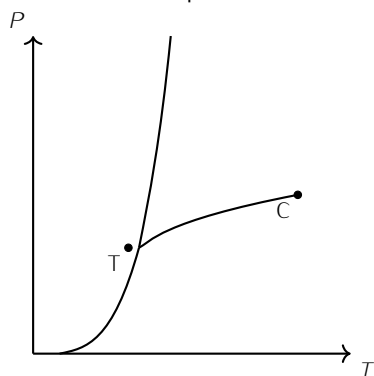
TRANSITION DE PHASE

Compléter le diagramme pT d'un corps pur en précisant les domaines du solide, du liquide et du gaz.



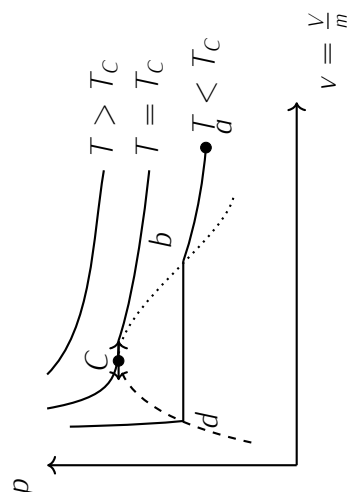
TRANSITION DE PHASE

Que sont les points T et C ?



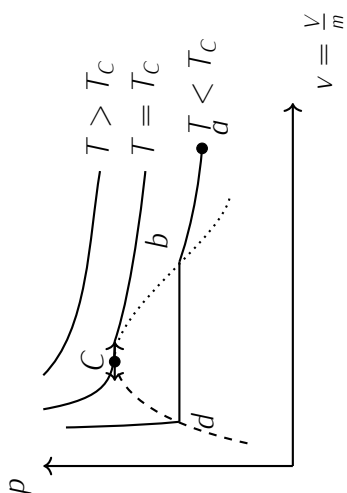
TRANSITION DE PHASE

Placer les différents états du corps pur.



TRANSITION DE PHASE

Préciser l'état du corps pur en a , b et d .



TRANSITION DE PHASE

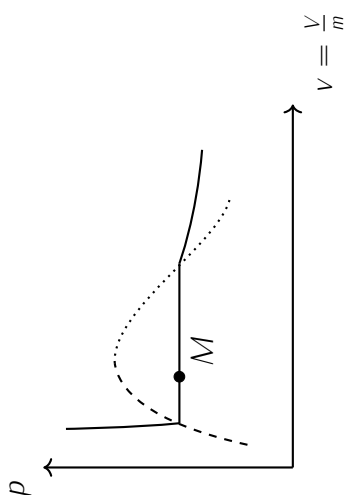
Énoncer le théorème des moments.

TRANSITION DE PHASE

Qu'est-ce que la pression de vapeur saturante?

TRANSITION DE PHASE

Déterminer la composition du système en M .

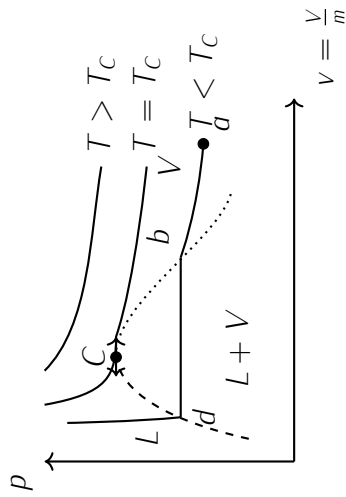


TRANSITION DE PHASE

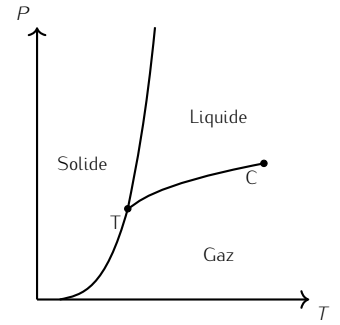
Définir la pression partielle.

TRANSITION DE PHASE

À quelle condition y-a-t'il équilibre liquide-vapeur d'un corps en présence d'une atmosphère inerte?



Le point T est le point triple. En ce point les trois phases coexistent. Ses coordonnées sont spécifiques à chaque corps pur. Le point C est le point critique, au-delà de ce point il n'y a plus d'équilibre liquide-vapeur.



La pression de vapeur saturante est la pression à laquelle un corps pur se trouve en équilibre diphasé. C'est la pression à laquelle se fait le changement d'état. Elle dépend de la température (cf diagramme pT).

Avec les notations usuelles :

$$x_v = \frac{ML}{LV}$$

a : vapeur sèche.
 b : vapeur saturante sèche
 d : liquide saturant

Il y a équilibre à condition que la pression partielle du corps soit égale à sa pression de vapeur saturante.

$$p_A = p_{\text{sat},A}(T)$$

La pression partielle est la pression qu'exercerait un constituant d'un mélange s'il était seul dans sa phase.

On utilise le théorème des moments pour déterminer le titre en vapeur x_v . On trouve $x_v \approx 0.68$

TRANSITION DE
PHASE

Définir la taux d'humidité ou humidité relative H .

TRANSITION DE
PHASE

Définir la chaleur latente.

TRANSITION DE
PHASE

Quel est le transfert thermique à fournir à 1 kg d'eau pour le faire passer de $T_i = 10^\circ\text{C}$ à $T_f = 120^\circ\text{C}$ sous une pression constante de 1 bar sachant que

:

$c_p = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'eau liquide, $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$; $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$.

$C_{pm} = 34 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la vapeur d'eau.

$L_{L \rightarrow V} = 2260 \text{ kJ.kg}^{-1}$ à 100°C sous 1 atm.

TRANSITION DE
PHASE

Quel est la relation entre la variation d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase

La transformation est isobare
donc $\Delta H = Q$, soit

$$Q = H_{\text{chauf liq}} + \Delta H_{\text{vapo}} + \Delta H_{\text{chauf vap}}$$

Donc

$$Q = m c_p (T_{\text{vap}} - T_i) + mL$$

$$+ n C_{pm} (T_f - T_{\text{vap}})$$

Numériquement

$$Q = 2674 \text{ kJ}$$

La chaleur latente est
l'énergie qu'il faut apporter,
par unité de masse, à un
corps pur pour qu'il passe
d'une phase 1 vers une phase
2

$$\Delta H = m L_{1 \rightarrow 2}$$

$$L_{1 \rightarrow 2} = h_2 - h_1$$

C'est la différence des
enthalpies massiques du
corps dans la phase 2 et dans
la phase 1, à la température
 T du changement d'état.

$$H = \frac{p_A}{p_{\text{sat},A}(T)}$$

$$\Delta h_{1 \rightarrow 2} = T \Delta s_{1 \rightarrow 2}$$

T_4 – Changements d'état

Conseils pour ce TD

- Les mêmes que ceux des TD précédents.
- Lorsque vous étudiez la transformation d'un système diphasé, schématisez la situation sur une figure, précisez bien le système étudié et le type de transformation.
- Il faut être à l'aise avec la notion de chaleur latente (ou enthalpie de changement d'état).
- Il est très important de savoir tracer l'allure des transformations subies par un système dans les diagrammes usuels (Clapeyron, entropique ou diagramme d'état).
- Habituez-vous à utiliser des lectures graphiques : relevés sur une courbe, théorème des moments.

Exercices

Exercice 24.1 — Évaporation de l'eau.



Dans une pièce hermétiquement fermée, de volume $V = 30 \text{ m}^3$, on place un récipient contenant un volume $V_0 = 200 \text{ mL}$ d'eau liquide. L'air de la pièce est à la pression $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ à la température $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Son degré d'hygrométrie est $H = 60\%$. H est le rapport de la pression partielle de l'eau divisée par la pression de vapeur saturante de l'eau, valant dans ces conditions $P_{\text{sat}} = 2,3 \text{ kPa}$. On assimile l'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

1. Calculer la quantité d'eau initialement contenue dans l'atmosphère de la pièce.
2. Montrer que toute l'eau contenue dans le verre s'évapore. Quel est le degré d'hygrométrie final de l'air de la pièce ?
3. Quel volume d'eau liquide faut-il évaporer pour saturer la pièce en eau ?

Exercice 24.2 — Vaporisation d'une masse d'eau..



Une masse $m = 1 \text{ g}$ d'eau liquide est contenue dans un cylindre thermostaté à la température $t_1 = 100^\circ\text{C}$, sous la pression $p_0 = 1 \text{ bar}$.

1. Par un déplacement très lent du piston jusqu'au volume V_1 , on réalise la vaporisation totale de l'eau.
 - (a) En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, déterminer et calculer le volume V_1 .
 - (b) Exprimer puis calculer le transfert thermique Q et le travail W échangés par l'eau.
 - (c) Exprimer puis calculer la variation d'entropie ΔS de l'eau, l'entropie échangée S_e et l'entropie créée S_c .

2. On place maintenant directement la même masse $m = 1$ g d'eau dans un volume V_1 initialement vide, thermostaté à la température $t_1 = 100$ °C.

Exprimer puis calculer Q' , W' , $\Delta S'$, S_e et S'_c .

Données : $L_{\text{vap}} = 2,25 \cdot 10^3$ kJ.kg⁻¹ à 100 °C et $M = 18$ g.mol⁻¹ pour l'eau.

Exercice 24.3 — Variation d'entropie lors d'un mélange eau liquide – glace.

Dans un récipient parfaitement calorifugé, on place une masse M d'eau à $\theta_1 = 20$ °C et une masse $m = 500$ g de glace à 0°C.

1. Déterminer la composition et la température du mélange à l'équilibre si $M = 1$ kg.
2. Déterminer la composition et la température du mélange à l'équilibre si $M = 4$ kg.
3. Dans le cas où $M = 1$ kg, déterminer la variation d'entropie de la masse d'eau
 - (a) initialement à l'état liquide.
 - (b) initialement à l'état solide.

La transformation est-elle réversible ?

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_e = 4,2$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹ ; chaleur latente (enthalpie massique) de fusion de la glace : $L = 336$ kJ.kg⁻¹.

Exercice 24.4 — Evolution isenthalpique.

Un récipient cylindrique horizontal est fermé par un piston pouvant coulisser sans frottement. La pression extérieure est maintenue constante et égale à $p_0 = 1$ atm.

Le récipient est initialement séparé en deux compartiments par une paroi escamotable. Le compartiment de gauche contient de l'eau liquide saturée ($m_1 = 1$ kg, $p_0 = 1$ atm, $T_1 = 373$ K), celui de droite est rempli de vapeur d'eau ($m_2 = 2$ kg, $p_0 = 1$ atm, $T_2 = 478$ K).

Le piston et les parois du récipient sont adiabatiques. On supprime la paroi (sans apport de travail)

1. Montrer que la transformation du système { eau } s'effectue à enthalpie constante.
2. Déterminer le titre massique en vapeur x_V à l'issue de la transformation.
3. Calculer la variation d'entropie lors de la transformation.

On donne les valeurs numériques des enthalpies massiques (h) et entropies massiques (s) :

- à $p_0 = 1$ atm et $T = 373$ K : $h_L = 419$ kJ.kg⁻¹ ; $h_V = 2675$ kJ.kg⁻¹ ; $s_L = 1,306$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹ et $s_V = 7,354$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹.
- à $p_0 = 1$ atm et $T = 478$ K : $h_V = 2884$ kJ.kg⁻¹ ; $s_V = 7,847$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

Exercice 24.5 — Détente d'un GP au contact d'un mélange eau + glace.

Un cylindre à parois diathermes, fermé par un piston, contient une mole d'un gaz parfait dans l'état initial ($T_1 = 273 \text{ K}$, $p_1 = 3 \text{ bars}$). Ce système est plongé dans un bain eau - glace constituant un thermostat à $0 \text{ }^\circ\text{C}$. On agit sur le piston mobile pour détendre, de façon réversible, le gaz jusqu'à la pression $p_2 = 1 \text{ bar}$.

1. Déterminer la masse m de glace apparaissant dans le thermostat, l'enthalpie massique de fusion de la glace étant $L_F = 334 \text{ J.g}^{-1}$.
2. Calculer la variation d'entropie du gaz et celle du thermostat.

Exercice 24.6 — Équilibre Liquide - Vapeur.



On cherche à obtenir du diazote liquide à la température de $T' = 78 \text{ K}$ pour laquelle la pression de vapeur saturante vaut $p' = 1 \text{ bar}$.

Pour ce faire, on réalise une détente adiabatique et réversible de l'état (vapeur saturante, $p < p_C$ pression du point critique, $T = 160 \text{ K}$, $s = 1,76 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) à l'état (p' , T' , s').

On sépare ensuite le liquide de la vapeur.

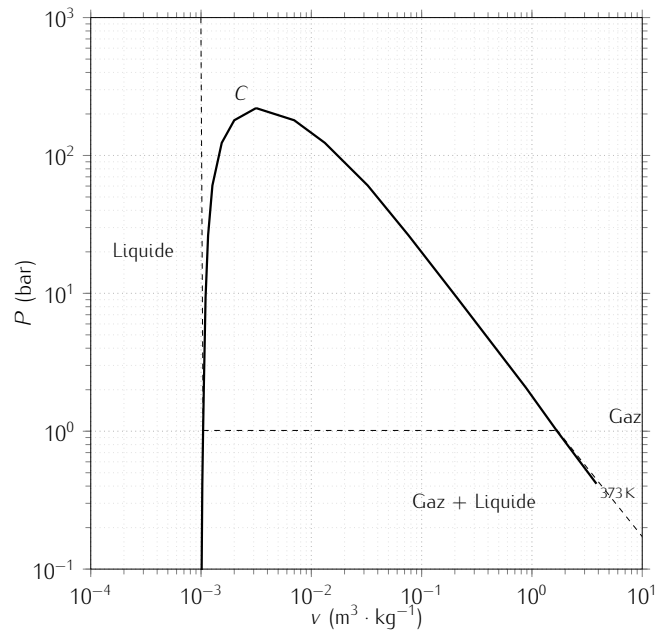
On donne les entropies massiques du diazote liquide et gazeux à la température $T' = 78 \text{ K}$: $s'_L = 0,44 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $s'_V = 2,96 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1. Représenter la transformation dans le diagramme entropique $T(s)$ en faisant figurer la courbe de saturation et les isobares p et p' .
2. Déterminer le titre en vapeur du mélange obtenu et la masse de diazote liquide obtenue par kilogramme de diazote traversant le compresseur.

Exercice 24.7 — Compression isotherme.



On considère une masse $m = 0,30 \text{ kg}$ d'eau sous forme de vapeur saturante, enfermée dans un cylindre vertical fermé à son extrémité supérieure par un piston sans masse, pouvant coulisser sans frottement le long des parois du cylindre. La pression extérieure P_e est égale à $1,0 \text{ bar}$. La figure ci-dessous montre le diagramme de Clapeyron de l'eau.



1. Quel est le volume occupé par la masse m d'eau ? Placer le point I correspondant à l'état initial de l'eau sur le diagramme de Clapeyron.
2. On comprime ensuite lentement le contenu du récipient, en maintenant la température constante, jusqu'à ce que la pression atteinte soit de 10 bar. Placer le point F correspondant à l'état final sur le diagramme de Clapeyron et tracer le chemin suivi de I à F .
3. Dessiner l'allure du diagramme (P, T) de l'eau et y placer le point I et le point F .

Annale de concours

Exercice 24.8 — Mines 2022.



On dispose d'un verre rempli avec 250 mL d'eau à la température $T_l = 25^\circ\text{C}$. On ajoute une masse $m = 150\text{ g}$ de glace à la température $T_g = -19^\circ\text{C}$.

1. Quel est l'état final du système ?
2. Est ce réversible ? (quantitatif)

Données :

- capacités thermiques de l'eau liquide $c_{p,l} = 4,2\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et de la glace $c_{p,g} = 2,1\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- enthalpie massique de fusion de la glace $L_f = 333\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- masse volumique de l'eau liquide $\rho = 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Réponses mélangées

$0,6 \text{ m}^3$	$H = 91\%$	23 mol	$6,0 \text{ J.K}^{-1}$	$0,163 \text{ J.K}^{-1}$
$0,4 \text{ J.K}^{-1}$	isenthalpique	7,46 g.	0,28 L	
0,73	11 J.K^{-1}	480 g	-297 J.K^{-1}	1,25 kg
1,7 L	0,52	2,25 kJ	$-9,13 \text{ J.K}^{-1}$	$9,13 \text{ J.K}^{-1}$