

TD 9 : Thermodynamique du changement d'état du corps pur diphasé

Exercice 1 : Correction d'affirmations erronées

Expliquer pourquoi les phrases suivantes sont fausses et, si possible, les rectifier pour les rendre exactes.

1. Un changement d'état a lieu à température et pression constantes.
2. Au cours d'un changement d'état isotherme d'un corps pur, l'énergie interne ne varie pas.
3. Au cours de la vaporisation isotherme d'un kilogramme d'un corps pur, la variation d'énergie interne est égale à l'enthalpie massique de vaporisation.
4. Au point triple, l'état d'un système est parfaitement déterminé.

Exercice 2 : Questions qualitatives sur les changements d'état

1. Dans une centrale nucléaire à REP (réacteur à eau pressurisée) le circuit primaire contient de l'eau liquide dont la température varie entre 286°C en entrée de la cuve du réacteur et 323°C en sortie de cuve. En utilisant un document du cours, déterminer si la pression est de 1,55 bar, 15,5 bar ou 155 bar.
2. Pourquoi les patins glissent-ils sur la glace ?
3. On remplit à moitié une bouteille d'eau minérale en plastique avec de l'eau chaude, puis on la ferme bien. Que se passe-t-il quand la bouteille refroidit ? Pourquoi ?

Exercice 3 : Canette auto réfrigérante

A l'occasion de la Coupe du Monde de Football 2002, une canette auto réfrigérante a été mise au point. Elle comprend un réservoir en acier contenant le liquide réfrigérant. Lorsqu'on ouvre la canette, ce liquide est libéré, il se détend brusquement et se vaporise en traversant une spirale en aluminium qui serpente à travers la boisson à refroidir. Le volume de la boisson à refroidir est 33 cl, et l'on considèrera pour simplifier qu'il s'agit d'eau de capacité thermique massique $c = 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

On considère que le corps réfrigérant est constitué d'une masse $m_r = 6 \text{ g}$ de N_2 dont l'enthalpie massique de vaporisation est $\ell_v = 200 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Calculer la variation de température de la boisson.

Exercice 4 : fonte de glace dans l'eau

On donne la capacité thermique massique de l'eau $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et la chaleur latente massique de fusion de la glace $\ell_f = 336 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$.

Dans un récipient parfaitement calorifugé, on met un morceau de glace à la température de 0°C dans un kilogramme d'eau initialement à la température de 20°C.

1. Déterminer la masse minimale de glace nécessaire pour que l'eau soit à la température de 0°C.
2. Calculer ΔS_e la variation d'entropie de l'eau initialement à l'état liquide.
3. Même question pour ΔS_g pour l'eau initialement sous forme de glace.
4. En déduire le bilan d'entropie de l'évolution. Conclure.

Exercice 5 : Calorimétrie et changement d'état

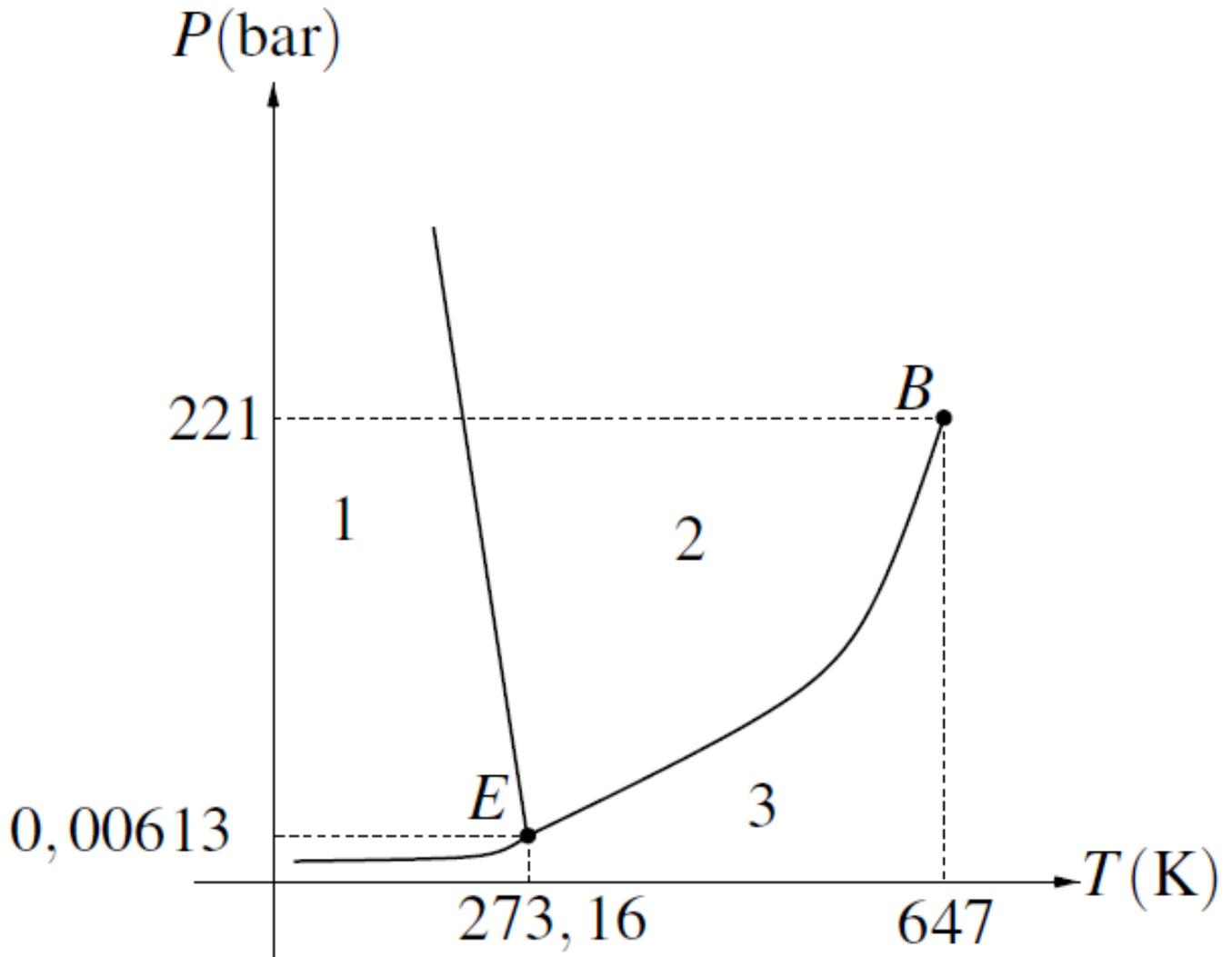
On donne la capacité thermique massique de l'eau $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et on suppose que les capacités thermiques massiques sont constantes dans le domaine de températures considérées.

Dans un calorimètre dont la valeur en eau est de $\mu = 30 \text{ g}$, on verse $m_1 = 150 \text{ g}$ d'eau.

Une fois l'équilibre thermique atteint, on mesure une température ambiante de 20°C. On plonge alors un cube de glace dont la masse est 20 g et dont la température initiale est de 0°C. A l'équilibre, on mesure une température de 11,7°C. Déterminer la chaleur latente massique de fusion de l'eau.

Exercice 6 : Étude de quelques transformations d'un corps

Dans cet exercice, on s'intéresse à l'eau dont le diagramme des phases est donné par :



1. Compléter en donnant les domaines d'existence des différentes phases et en définissant les points caractéristiques.
2. Définir la pression de vapeur saturante et préciser de quel(s) paramètre(s) elle dépend.
3. Comment appelle-t-on le passage de la vapeur au liquide ?
4. Représenter le diagramme donnant la pression en fonction du volume pour la transformation correspondante. On définira les domaines et on tracera les courbes de rosée et d'ébullition.
5. Soit une enceinte cylindrique diathermane de volume initial V , ce volume pouvant être modifié en déplaçant sans frottement un piston. L'ensemble est maintenu sous la pression atmosphérique à la température $T = 373$ K.
A cette température la pression de vapeur saturante vaut 1,0 bar. La vapeur d'eau sèche et saturante sera considérée comme un gaz parfait.
On néglige le volume occupé par la phase liquide devant le volume occupé par la vapeur, ainsi le volume de la phase gazeuse est égal au volume total de l'enceinte. Le cylindre étant initialement vide, on introduit, piston bloqué, une masse m d'eau. Déterminer la masse maximale m_{\max} d'eau qu'on peut introduire pour que l'eau soit entièrement sous forme vapeur. On donnera sa valeur en fonction de R , T , V , P_S la pression de vapeur saturante et M_{eau} la masse molaire de l'eau.

6. On considère que la masse d'eau introduite est inférieure à m_{\max} . Dans quel état se trouve l'eau ?
7. Pour obtenir l'équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'eau, faut-il augmenter ou diminuer le volume ? Déterminer le volume limite V_{lim} à partir duquel on a cet équilibre.
8. La masse m d'eau introduite est telle qu'on a l'équilibre entre les phases liquide et vapeur. Déterminer la fraction massique d'eau sous forme vapeur.

Exercice 7 : Vaporisation du diazote

On place de l'azote liquide (constitué de molécule de diazote) dans un récipient posé sur une balance. Il est possible de chauffer le liquide par une résistance parcourue par un courant de $I = 2,95$ A et soumise à une tension de $U = 16,5$ V. La puissance thermique dégagée par effet Joule est $P = UI$.

On mesure alors l'évolution de la masse de l'azote au cours du temps :

temps (min)	masse (g)	temps (min)	masse (g)
0	415	9	361
1	411	10	345
2	409	11	329
3	406	12	314
4	403	13	298
5	400	14	296
6	397	15	294
7	394	16	292
8	377	17	289

1. Tracer la masse d'azote en fonction du temps.
2. Analyser cette évolution.
3. Montrer que les données précédentes permettent de déterminer l'enthalpie de vaporisation de l'azote. Obtenir sa valeur numérique à partir des données.

Exercice 8 : Formation de la neige artificielle

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant de fines gouttes d'eau liquide à $T_1 = 10$ °C dans l'air ambiant à $T_a = -15$ °C.

1. Dans un premier temps la goutte d'eau supposée sphérique (rayon $R = 0,2$ mm) se refroidit en restant liquide. Elle reçoit de l'air extérieur un transfert thermique $h(T_a - T(t))$ par unité de temps et de surface, où $T(t)$ est la température de la goutte. On rappelle que la masse volumique de l'eau est $\rho = 10^3$ kg.m⁻³ et sa capacité thermique massique $c = 4,18 \cdot 10^3$ J.kg⁻¹.
 - a) Établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.
 - b) En déduire le temps t auquel $T(t)$ est égale à -5 °C. Effectuer l'application numérique pour $h = 65$ W.m⁻².K⁻¹.
2.
 - a) Lorsque la goutte atteint la température de -5 °C, la surfusion cesse : la goutte est partiellement solidifiée et la température devient égale à 0 °C. Calculer la fraction x de liquide restant à solidifier en supposant la transformation très rapide et adiabatique. On néglige aussi la variation de volume. L'enthalpie massique de fusion de la glace est $\ell_f = 335 \cdot 10^3$ J.kg⁻¹.
 - b) Au bout de combien de temps la goutte est-elle complètement solidifiée ?

Exercice 9: changements d'état de l'eau

On se place dans l'atmosphère : la pression est fixée à $P = P_0 = 1,000 \text{ atm}$. La température T peut varier. On va étudier les transformations physiques de l'eau. Celle-ci peut se trouver sous la forme liquide ($\text{H}_2\text{O}(\text{l})$), glace ($\text{H}_2\text{O}(\text{s})$), ou vapeur ($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$). On donne les enthalpies et entropies massiques des différents états de l'eau à la pression p_0 , que l'on considérera indépendants de la température (cf. tableau).

H_2O	solide	liquide	vapeur
h° (en J.kg^{-1})	$-1,623.10^7$	$-1,59.10^7$	$-1,344.10^7$
s° (en $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	$2,66.10^3$	$3,88.10^3$	$1,05.10^4$

1. $\text{H}_2\text{O}(\text{s}) = \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

Montrer qu'il existe une température limite T_f qui délimite les domaines d'existence de la glace et de l'eau liquide. Application numérique : que vaut T_f ?

2. $\text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{H}_2\text{O}(\text{g})$.

On supposera que la vapeur d'eau est un gaz parfait à la pression p_v (et pas nécessairement à p_0).

a) Montrer qu'il existe une température limite T_v au delà de laquelle toute l'eau liquide se vaporise (elle "bout"). Application numérique : que vaut T_v ?

b) Montrer aussi qu'en deçà de T_v un équilibre thermodynamique est possible entre l'eau liquide et sa vapeur à une pression p_{sat} (dite "pression de vapeur saturante"). Exprimer p_{sat} en fonction de T et des constantes de l'énoncé.

On donne la formule semi empirique de Duperray : $\ln [p_{\text{sat}}(T)] = A - B/T - D \cdot \ln(T)$. La formule trouvée précédemment coïncide-t-elle ?

3. Evaporation de l'eau :

Supposons que $T < T_v$. On définit le degré d'humidité de l'air par $\theta = \frac{p_v}{p_{\text{sat}}}$, qui est typiquement de l'ordre de 50% à 75%.

a) Expliquer pourquoi l'eau liquide s'évapore.

b) Quelle est la différence fondamentale entre l'évaporation et l'ébullition ?

c) Pourquoi les facteurs suivants favorisent l'évaporation d'un linge : l'étendage, le vent et le soleil.

d) Expliquer aussi pourquoi l'on peut "attraper froid" si l'on a transpiré.

4. Condensation de l'eau

a) Expliquer pourquoi lorsque l'on pénètre dans une voiture en hiver les vitres se couvrent de buée.

b) Expliquer aussi le phénomène de la rosée du matin.

Exercice 10 : chaleur latente de sublimation du naphthalène

Un des constituants essentiels des produits antimites est le naphthalène, dont les pressions saturantes de sublimation valent respectivement : $1,09 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ s à 6°C et $5,37 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ s à 21°C .

1. Calculer la chaleur latente de sublimation du naphthalène.

2. Déterminer la pression de sublimation en Torr à 31°C .

On donne la formule de Clapeyron : $\frac{dp}{dT} = \frac{\ell_{1 \rightarrow 2}}{T_{1 \rightarrow 2}(v_2 - v_1)}$

$\ell_{1 \rightarrow 2}$ est la chaleur latente massique de changement d'état.

v_1 et v_2 sont les volumes massiques des phases