

Changement d'état d'un corps pur

EX 1 – Détermination expérimentale d'une enthalpie de fusion

Une masse d'eau liquide $m_e = 200$ g est introduite dans un calorimètre parfait, de masse équivalente en eau $\mu = 20$ g. L'ensemble est initialement à la température $T_e = 25.0^\circ\text{C}$. On introduit une masse $m_g = 10$ g de glace à la température $T_g = -5.0^\circ\text{C}$. A l'équilibre thermique, on mesure la température $T_{eq} = 20.4^\circ\text{C}$. L'expérience est réalisée à la pression atmosphérique $p = 1013$ hPa.

Capacités thermiques massiques de l'eau : liquide $c_e = 4.18$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹, glace $c_g = 2.1$ kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

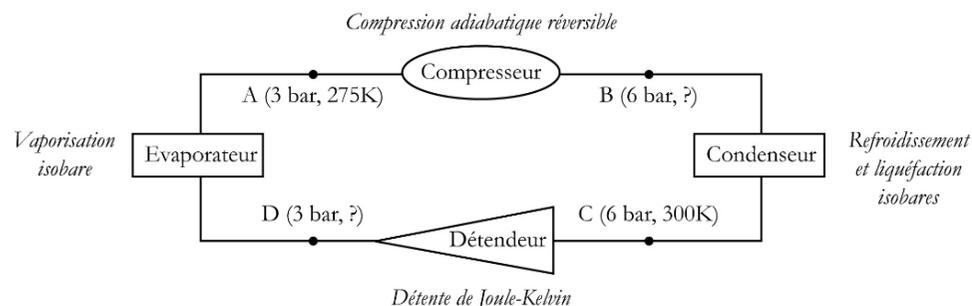
1. Déterminer l'enthalpie massique (chaleur latente) de fusion de l'eau l_f .
2. En déduire la variation d'entropie au cours de la transformation du système constitué des deux masses d'eau et du calorimètre. Commenter son signe.

EX 2 – Energie de changement d'état

Calculer la variation d'énergie interne d'un kg d'eau liquide à 100°C lorsqu'on le vaporise sous la pression de 1 bar. On assimilera la vapeur d'eau à un gaz parfait. On rappelle l'enthalpie de vaporisation $l_v(100^\circ\text{C}) = 2257$ kJ.kg⁻¹.

EX 3 – Machine thermique avec changement d'état *

Le fonctionnement d'un climatiseur ou d'une pompe à chaleur peut être représenté par le cycle de transformations suivant ¹



1. On admettra qu'une détente de Joule Kelvin (ou Thomson), à savoir un écoulement forcé à travers un milieu poreux, est **adiabatique** et **isenthalpique**.

A est le point de rosée à la température $T_A = 275$ K et C le point d'ébullition à la température $T_C = 300$ K. En B le fluide circulant dans la machine thermique est entièrement sous forme de vapeur et en D il est sous forme diphasique.

Le fluide sous forme vapeur est assimilé à un gaz parfait, avec $\gamma = 1.4$ et une masse molaire $M = 30$ g.mol⁻¹. Les capacités thermiques massiques sont supposées indépendantes de la température :

- Capacité thermique massique du liquide $c_l = 2.0$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹.
- Capacité thermique massique du gaz à pression constante $c_p = 970$ J.K⁻¹.kg⁻¹.
- Chaleur latente de vaporisation à 275 K, $l_v = 300$ kJ.kg⁻¹.

1. Tracer le diagramme du cycle dans le système de coordonnées de Clapeyron.
2. Déterminer les températures T_B et T_D .
3. Déterminer le titre massique en vapeur x_D au point D.
4. Calculer l'efficacité de la machine considérée comme un climatiseur, puis celle de la machine considérée comme une pompe à chaleur.

EX 4 – Lois régissant les principales transformations *

On considère un corps pur de masse m subissant diverses transformations présentant un changement d'état liquide-vapeur total ou partiel. On note x le titre massique en vapeur.

1. Le système subit une transformation **isobare** de 3 types :
 - i. sans franchissement de la courbe de saturation, de l'état initial (x_i, T, p) à l'état final (x_f, T, p) .
 - ii. avec franchissement de la courbe de rosée, de l'état initial (x_i, T_i, p) à l'état final (vapeur, $T_f, p)$.
 - iii. avec franchissement de la courbe d'ébullition, de l'état initial (liquide, $T_i, p)$ à l'état final (x_f, T_f, p) .

Dans chaque cas, calculer le transfert thermique reçu Q ainsi que la variation d'entropie ΔS , en fonction de l'enthalpie de vaporisation l_v , et des capacités thermiques massiques à pression constante du gaz c_p , et du liquide c_l du corps (qu'on considèrera indépendantes de la température).

2. Le système subit une **détente isenthalpique** de Joule-Thomson avec franchissement de la courbe d'ébullition, de l'état initial (liquide, $T_i, p_i)$ à l'état final (x_f, T_f, p_f) . Quelle équation est vérifiée par la température finale T_f ? (on considèrera c_l indépendante de la température).
3. Le système subit une détente ou compression **adiabatique réversible** entre l'état initial (x_i, T_i, p_i) à l'état final (x_f, T_f, p_f) . En considérant c_l indépendante de la température, établir la relation entre T_f et T_i .

EX 5 – Surfusion du phosphore *

Un calorimètre de capacité thermique négligeable contient $m = 10$ g de phosphore liquide surfondu à la température $T_0 = 34^\circ\text{C}$, sous la pression atmosphérique.

1. On fait cesser la surfusion par un choc et on observe un nouvel état d'équilibre diphasé du phosphore. Déterminer la masse de chacune des phases.
2. Calculer la variation d'entropie correspondante.
3. Quel serait l'état final du système si l'on faisait cesser la surfusion d'une même masse de phosphore initialement à la température $T'_0 = 17^\circ\text{C}$?

Température de fusion à la pression atmosphérique : $T_f = 44^\circ\text{C}$;
 Chaleur latente massique de fusion : $l_f(T_f) = 20.9\text{ kJ.kg}^{-1}$;
 Capacité thermique massique du phosphore liquide : $c_l = 0.795\text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ (supposée constante dans l'intervalle de température considéré) ;
 Capacité thermique massique du phosphore solide : $c_s = 0.840\text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

EX 6 – Machine à vapeur : cycle de Rankine *

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- Etat A : l'eau est à l'état liquide saturant seul (juste saturant), à la pression $P_1 = 0,2$ bar et la température $T_1 = 60^\circ\text{C}$;
- de A à B : l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe, jusqu'à la pression $P_2 = 15$ bar ;
- de B à C : l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température $T_2 = 200^\circ\text{C}$, telle que $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$;
- de C à D : l'eau se vaporise entièrement à la température T_2 ;
- de D à E : la vapeur est admise dans le cylindre à T_2 et P_2 et effectue une détente adiabatique et isentropique jusqu'à la température T_1 ; on obtient alors un mélange liquide-vapeur ;
- de E à A : le piston chasse le mélange liquide-vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

1. Faire un schéma du dispositif en représentant les différentes étapes.
2. Représenter le cycle sur le diagramme (P, h) donné ci-contre. Quel est le titre massique en vapeur dans l'état E ?
3. Déduire du diagramme le transfert reçu pour chaque transformation.
4. Calculer le rendement de ce moteur et le comparer au rendement de Carnot. Quelles sont les causes d'irréversibilité ?

