INSA de Rouen
Département Energétique et propulsion
Enseignement Thermodynamique et Machines Thermiques (A. Coppalle)

Vaporisation et Condensation de l'eau dans une enceinte munie d'un piston mobile

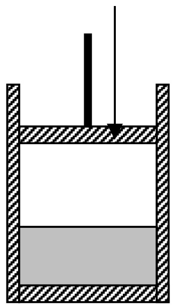
Données pour l'eau
La vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait.
Le volume massique de l'eau liquide est constant et égale à $v_l=10^{-3}$ (SI)
On prendra Lvap= 2450 kJ/Kg ,
La constante massique des gaz parfait pour l'eau r_{h2o} = 8,32/0,018 (SI) et La pression de vapeur saturante est donnée par :

$$\mathrm{Ln}(P_{vap}/ P^0_{vap}) = (1/T_0-1/T)\, L_{vap}/ r_{h2o}$$, **P doit être en atm et T en K**

avec P^0_{vap}=1 atm et T0=373 K
1 atm= 1,013 10^5 Pa.

Etude de la vaporisation ou de la liquéfaction d'une masse d'eau enfermée dans un cylindre muni d'un piston mobile.

Piston mobile permettant de diminuer ou d'augmenter le volume du cylindre



Pression extérieure
Ambiante : 1atm
Température extérieure
Ambiante : T_{amb}=20°C

Le dispositif est représenté par le schéma ci-contre.
Le piston mobile est muni d'une poignée pour le faire descendre ou monter, ce qui permet de diminuer ou d'augmenter le volume interne de l'enceinte.
Celle-ci contient initialement une masse m d'eau sous forme liquide et vapeur.

le mélange dans le cylindre est initialement en équilibre à la température Ti=100°C,
et donc à la pression Pi=1atm.
La masse m est égale à 1Kg et le titre initial de vapeur est x_{vi}=0,5.
La vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait dont la constante massique est égale à

r_{h2o} = 8,32/0,018 (SI).

Calculer la valeur numérique du volume initial Vi du cylindre

les parois du cylindre ne laissent pas passer la chaleur
On pousse le piston mobile (le volume interne du cylindre diminue).
La transformation est très lente de telle sorte que le mélange est toujours à l'équilibre thermodynamique.
On arrête le piston quand la pression finale est de 2 atm et on constate qu'il existe toujours un mélange liquide vapeur.
1°-a) *Calculer la température finale Tf du mélange.*
Faire l'application numérique.
1°-b) Soit $s_{mél}(T,x_v)$, l'entropie massique du mélange liquide vapeur à la température T et avec un titre de vapeur x_v. En partant d'une masse m d'eau liquide à To d'entropie massique so, *donner la relation qui existe entre $s_{mél}$, T, x_v, L_{vap} et c_l (la capacité calorifique de l'eau liquide).*
On supposera que chaleur latente de vaporisation L_{vap} et c_l la capacité calorifique de l'eau liquide sont constantes et connues.
1°-c) *en déduire le titre de vapeur x_{vf} à la fin de la compression.*
Donner la valeur numérique du ce titre sachant que Lvap= 2450 10^3 (SI) et c_l=4,18 10^3 (SI)
1°-d) Soit $u_{mél}(T,x_v)$, l'énergie interne du mélange liquide vapeur à la température T et avec un titre de vapeur x_v. En partant d'une masse m d'eau liquide à To et d'énergie interne uo,
donner la relation qui existe entre $u_{mél}$,T et x_v, sachant que Lvap, c_l et v_l sont constants et connus.
Dans cette formule, on pourra négliger le volume massique v_l de l'eau liquide devant celui de la vapeur v_v.

1°-e) *En déduire le travail effectuer pour comprimer le mélange liquide vapeur faire l’application numérique*

les parois du cylindre laissent passer la chaleur
On laisse le piston bouger librement

2°-a) *Que va-t-il se passer quand on laisse le cylindre évoluer à la température ambiante ? En particulier comment évoluent pendant les premiers instants la pression et le titre de vapeur à l’intérieur du cylindre ?*

2°-b) *Que va-t-il se passer au bout d’un certain temps ?*

On suppose que la chaleur perdue par unité de temps par le dispositif est constante et égale à 1500 W. *Au bout de combien de temps le piston ne bouge plus ?* On prendra pour la chaleur latente de vaporisation.

Réponses

$V_i = V_{i,l} + V_{i,v} = [(1-X_v)v_l + X_v v_v(Ti)]m$

La vapeur est un gaz parfait: $v_v = r_{H2O} Ti/P_{vap}(Ti)$, $P_{vap}(Ti)$, $1{,}013\ 10^5$ Pa===> $v_v = 1{,}702\ m^3/kg$

On a $X_v = 0{,}5$, donc $V_i = 0{,}851\ m^3$. (Rq $V_i \approx V_{i,v}$)

les parois du cylindre ne laissent pas passer la chaleur

1°-a) état final: mélange liquide vapeur, donc $Ln(P_{vap}/1) = (1/373 - 1/T_f)\ L_{vap}/\ r_{h2o}$

P_{vap}=2 atm ===> Tf= 392,1 K

1°-b) calcul de $s(T, x_v)$ à l'aide de deux transformations :

T0, eau liquide ----> Pvap, T, eau liquide ----> Pvap, T, mélange liquide-vapeur Xv

Δs par unité de masse : $c_l\ Ln(T/T0)$ $\quad\quad$ $x_v\ L_{vap}(T)/T$

Avec les deux même transformations, on trouvera pour $s(T, x_v)$

$$s(T, x_v) = s_0 + c_l Ln(T/T0) + x_v\ L_{vap}(T)/T$$

1°-c) Transformation adiabatique et réversible: Δs=0

===> $c_l Ln(Ti/T0) + x_{vi}\ L_{vap}/Ti = c_l Ln(Tf/T0) + x_{vf}\ L_{vap}/Tf$

On obtient $c_l Ln(Tf/Ti)/L_{vap}(Ti)/Ti = x_{vi}/Ti - x_{vf}/Tf$

A.N. : x_{vf}=49,2%

1°-d) calcul de $u(T, x_v)$ à l'aide de deux transformations :

T0, eau liquide ----> Pvap, T, eau liquide ----> Pvap, T, mélange liquide-vapeur

Echange par unité de masse : $c_l\ (T-T0)$ $\quad\quad$ $x_v\ L_{vap} + W_{vap}$

On montre facilement que $W_{vap} = -\ P_{vap}\ (v_{mél} - v_l) = -\ P_{vap}\ x_v\ (v_v - v_l)$

===> $\Delta u = u(T, x_v) - u_0 = c_l\ (T-T0) + x_v\ L_{vap} - P_{vap}\ x_v\ (v_v - v_l)$

$$u(T, x_v) = u_0 + c_l\ (T-T0) + x_v\ L_{vap} - P_{vap}\ x_v\ (v_v - v_l)$$

$$\approx u_0 + c_l\ (T-T0) + x_v\ L_{vap} - X_v\ r_{H2O}\ T$$

1°-e) ΔU=m Δu= Δu (m=1 kg, d'après l'énoncé)

$\Delta U = W$ ===> $W = c_l\ (Tf-Ti) + (X_{vf} - X_{vi})L_{vap} + r_{H2O}\ (X_{vf}\ Tf - X_{vi} Ti)$ = 75 kJ

les parois du cylindre laissent passer la chaleur

2°-a) Le mélange liquide/vapeur perd de la chaleur. Tant qu'il y a un mélange, P=Pvap=1atm et la température (=100°C) ne change pas. Par contre le titre diminue. Le piston descend.

2°-b) Au fur et à mesure des échanges de chaleur avec l'extérieur, le piston descend. Quand il ne reste plus de vapeur, le piston ne bouge plus.

$\Delta U/\Delta t = -1500\ W = m[(X_{vf} - X_{vi})L_{vap} + r_{H2O}\ (X_{vf} - X_{vi})T]$, avec T=373 K

===> Δt= 759 s