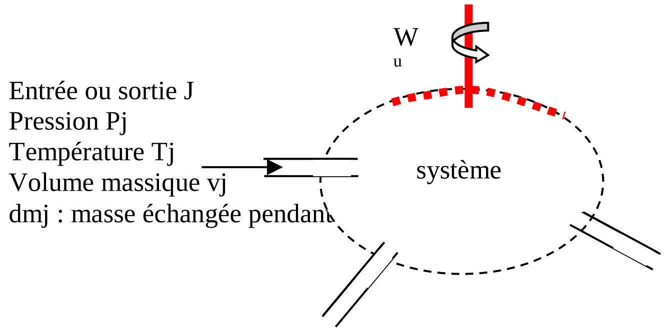
INSA de Rouen
Département Energétique et propulsion
Enseignement Thermodynamique et Machines Thermiques (A. Coppalle)

Fuite d'un réservoir d'ammoniac liquide

Questions de cours

1°) Soit un système ouvert à plusieurs entrées ou sorties.
On néglige les énergies cinétiques et de pesanteur.
Certaines parties du système sont mobiles et reliées à un axe sur lequel on récupère du travail utile W^u.
En appliquant le 1er principe,
montrer que la variation d'énergie interne dU du système pe

est donnée par $dU = \partial W^u + \partial Q + \sum_j h_j dm_j$



avec δW^u le travail utile et δQ la chaleur échangés par le système pendant dt.
h_j est l'enthalpie du fluide dans les conditions de l'entrée/sortie J.
2°) Le système est à une entrée 1 une sortie 2. Si le système est dans un régime permanent, c'est-à-dire que son énergie interne U ne varie pas, *Montrer que dans ce cas*

$$\delta h_{1-2} = \delta q_{1-2} + \delta w^u_{1-2}$$

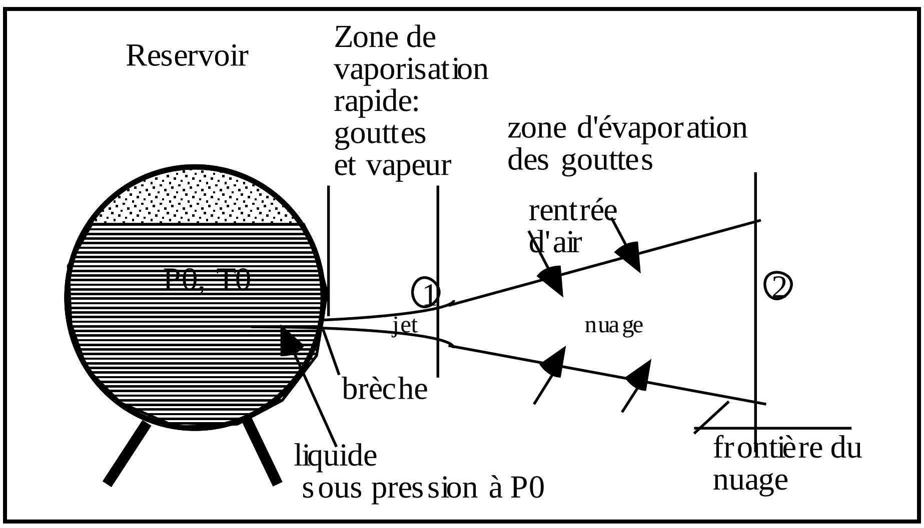
avec δh_{1-2} la variation d'enthalpie de l'unité de masse du fluide qui rentre en 1 et sort en 2.
(les grandeurs en minuscule sont massique)

Etude d'une fuite d'un réservoir d'ammoniac liquide

Un réservoir contient sous la pression P_0 de l'ammoniac liquide à T_0=290 K . Le liquide est en équilibre avec sa vapeur.
Une brèche permet au liquide de s'échapper brutalement du réservoir. A la sortie de la brèche il existe dans l'atmosphère deux zones:

- 1ère zone: A la sortie de la brèche il se forme un **jet** qui contient de l'ammoniac liquide mais aussi de l'ammoniac gazeux qui résulte de la vaporisation rapide du liquide qui sort du réservoir. Dans cette zone, l'air n'a pas le temps de se mélanger à l'ammoniac.
- 2ème zone: il se développe ensuite un écoulement en forme de **nuage** dans lequel l'air est entraîné. Les gouttes d'ammoniac vont donc peu à peu s'évaporer.

Le dessin ci-dessous est une représentation des phénomènes qui se produisent à la sortie de la brèche.



Dans tout le problème on considère que :

- Les phénomènes sont stationnaires,
- la pression dans le jet et dans le nuage est constante et égale à Patm=1,013 bar
- la vapeur d'ammoniac et l'air sont des gaz parfaits.

Pour connaitre les caractéristiques de l'ammoniac, on utilisera le tableau fourni ci-dessous.

1°) **Question indépendante sur la validité des données du tableau fourni.**
Les variations de pression de vapeur saturante P_{vap} en fonction de la température sont données par la relation de Clapeyron

$$\frac{dP_{vap}}{dT} = \frac{L}{v_g T},$$

ou L est la chaleur latente de vaporisation et v_g le volume massique du gaz. Les variations de L avec la température sont données par la loi empirique suivante

$$L = 2173\ 10^3 - 3.35\ 10^3\ T(K) \quad (SI).$$

- *Vérifier la validité de cette relation* en comparant les valeurs qu'elle fournit à celles données dans le tableau ci-dessous pour T= 240 K et T = 290 K.(Rappel 1 cal=4,18 J)
- *Donner l'expression des variations de Pvap en fonction de T*, on prendra comme état de référence l'état d'équilibre à 290 K. (r= 489, SI)

2°) *quel est la pression P0 dans le réservoir?*

3°) Calcul de la vaporisation rapide. On suppose que l'expulsion du liquide, hors du réservoir, est très rapide et donc adiabatique. On suppose aussi que l'état final (en 1) est un mélange de gouttes et de vapeur en équilibre.
- *Quelle est la température finale T1 de cette zone?*
- *calculer la fraction massique X_{v1} de vapeur d'ammoniac formée à la fin de cette zone*. Pour cela, on utilisera uniquement les paramètres dont les valeurs sont disponibles dans le tableau fourni.

Faire l'application numérique.

4°) Etude du nuage. Au début du nuage (en 1), il y a donc un mélange d'ammoniac gazeux et liquide. Progressivement de l'air, à la température $\mathbf{T_{amb}}$, rentre dans le nuage. A la fin du nuage (en 2) il n'y a plus de gouttes d'ammoniac.
On appelle X_{air} la fraction massique de l'air en 2 et X_{v2} celle de l'ammoniac.
- *Quelle est la relation entre X_{air} et X_{v2}?*
- *Faire le bilan enthalpique de ce nuage.*

On donne les caractéristiques de l'air, $Cp_{air}=10^3$ J/kg/K et $T_{air}=293$ K.

5°) Si le nuage reste à température constante (T1=T2), montrer que la fraction massique de l'air en 2 est donnée par :

$$X^0_{air} = \frac{[\,h_v(T1) - h_v(T0)]}{[\,c_p(Tamb - T1) + h_v(T1) - h_v(T0)]}$$

- Montrer que si X_{air} est inférieure à X^0_{air} alors T2 est inférieur à T1, le nuage se refroidit en même temps que les gouttes se vaporisent.
- Comment expliquer ce dernier phénomène?

équilibre liquide-vapeur
(pour chaque grandeur le premier nombre est relatif au liquide, le duxième nombre est relatif à la vapeur)

ρ = masse volumique ($kg.m^{-3}$)
h = enthalpie ($kcal.kg^{-1}$)
s = entropie ($kcal.kg^{-1}.K^{-1}$)
L'enthalpie et l'entropie sont nulles pour le cristal parfait au zéro absolu et à une atmosphère.

T (K)	P (bar)	ρ	h	s
230	0,6061	693,8	182,54	1,1743
		0,5513	516,32	2,6256
239,74	1,01325	682	192,95	1,2178
		0,86	519,86	2,5816
240	1,0258	681,55	193,22	1,2189
		0,9009	519,96	2,5804
250	1,6536	669,0	203,97	1,2629
		1,409	523,66	2,5417
260	2,559	656,1	214,83	1,3052
		2,121	527,07	2,5059
270	3,819	642,7	225,87	1,3463
		3,094	530,06	2,4730
280	5,518	629,2	236,96	1,3862
		4,387	532,70	2,4425
290	7,753	614,9	248,30	1,4255
		6,076	534,93	2,4137
300	10,624	599,9	259,69	1,4637
		8,244	536,58	2,3867
310	14,249	584,5	271,25	1,5013
		11,02	537,69	2,3608
320	18,73	568,1	283,06	1,5383
		14,51	538,69	2,3350
330	24,22	550,8	295,15	1,5747
		18,92	538,57	2,3121
340	30,82	532,4	307,66	1,6105
		24.47	537.52	2,2875

Réponses

Questions de cours

1°) Démonstration faite en cours. Raisonnement que les élèves doivent comprendre et savoir

2°) Démonstration faite en cours. Raisonnement que les élèves doivent comprendre et savoir

Etude d'une fuite d'un réservoir d'ammoniac liquide

1°) Question indépendante :

T= 240 K, alors L= 1369 kJ/kg, valeur lue dans le tableau L_{Tab}= hv-hl=1366 kJ/kg

T= 290 K, alors L= 1201 kJ/kg, valeur lue dans le tableau L_{Tab}= 1198 kJ/kg

===> bon accord entre les valeurs

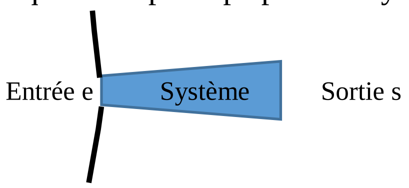
$\frac{dP}{dT} = \frac{L\,P}{r\,T^2}$ ===> si on pose L= A+BT, on obtient $Ln\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = -\frac{A}{r\,T} + \frac{A}{r\,T_{ref}} + \frac{B}{r} Ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)$

T_{ref}=290 K, P_{ref}= 7,75 bar

2°) P0= 7,75 bar = 7,75 10^5 Pa

3°) Si P1= 1,013 bar, alors T1=240 K d'après le tableau fourni

On applique le 1er principe pour un système ouvert au cas du jet de liquide qui est sorti du réservoir.



Le jet est un système ouvert adiabatique et sans travail utile : hs =he

En régime permanent : $m_e = m_s$ (kg/s) et donc pas d'entrée d'air.

Pendant dt, si on a une masse de liquide δm_l qui sort du réservoir, il y aura en sortie du jet

$\delta m_l X_{v1}$ masse de vapeur

$\delta m_l (1-X_{v1})$ masse de liquide, avec X_{v1} la teneur en vapeur

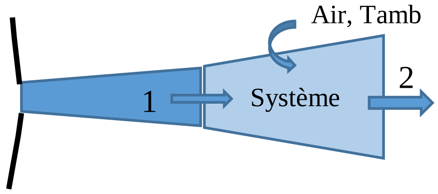
L'application de la relation hs =he donne :

$$\delta m_l h_l(T0, P0) = \delta m_l\, X_{v1} h_l(T1, P_{atm}) + \delta m_l\,(1 - X_{v1}) h_v(T1, P_{atm})$$

$$===> X_{v1} = \frac{h_l(T0,P0) - h_l(T1,P_{atm})}{h_v(T1,P_{atm}) - h_l(T1,P_{atm})}$$

A.N. : $X_{v1} = \frac{248,3 - 192,95}{519,86 - 192,95}$ = 16,9 %

4°)



Le nuage est un système ouvert à deux entrées et une sortie, sans échange de chaleur ni travail utile

A priori T2 et Tamb sont différents

$X_{air} + X_{v2} = 1$

Pendant dt, on définit δm_1 une quantité de matière qui rentre en 1, et δm_{air} quantité d'air qui rentre dans le nuage

Enthalpie pour les entrées du système 'nuage':

$\delta m_1\,[(1 - X_{v1}) h_l(T1) + X_{v1} h_v(T1)] + \delta m_{air}\, h_{air}(T_{amb})$

Enthalpie pour la sortie du système 'nuage':

$\delta m_{vap,2}\, h_v(T2) + \delta m_{air}\, h_{air}(T2)$, Rq : toutes les enthalpies sont prises à $P=P_{atm}$

On a : $\delta m_{vap,2} = \delta m_1 = X_{v2}(\delta m_{air} + \delta m_1)$,

et $\delta m_{air} = X_{air}(\delta m_{air} + \delta m_1)$,

le bilan enthalpique du nuage :

$X_{v2}[(1 - X_{v1}) h_l(T1) + X_{v1} h_v(T1)] + X_{air}\, h_{air}(T_{amb}) = X_{v2}\, h_v(T2) + X_{air}\, h_{air}(T2)$

Avec le résultat du 3°), on a $(1 - X_{v1}) h_l(T1) + X_{v1} h_v(T1) = h_l(T0)$

Le bilan enthalpique devient :

$X_{v2}\, h_l(T0) + X_{air}\, h_{air}(T_{amb}) = X_{v2}\, h_v(T2) + X_{air}\, h_{air}(T2)$

Pour l'enthalpie de l'air, on prend $h_{air}(T) = c_{p,air}\, T$, c.a.d que l'origine des enthalpies est à 0 K,

pour être cohérent avec l'origine des enthalpies de NH3 données dans le tableau.
Le bilan enthalpique devient :

$$X_{v2}\, h_l(T0) + X_{air} C_{p,air}\, T_{amb} = X_{v2}\, h_v(T2) + X_{air} C_{p,air}\, T2$$

Cette relation peut être utilisée pour calculer X_{air} ou T2. Mais ces deux variables sont couplées et elle dépendent de la taille du nuage que l'on considère.

5°) Si on considère T2 ≈ T1, cela veut dire que l'on ne s'intéresse qu'à la première partie du nuage, pour laquelle seule l'évaporation des gouttes de NH3 se produit,
sans le réchauffement du nuage lui-même.
-En remplaçant T2 par T1 et X_{v2} par $1-X_{air}$ dans le bilan enthalpique, on obtient la relation recherchée.
-Si $X_{air} < X^0 air$: Il n'y a pas assez de chaleur apportée par l'air pour évaporer à température constante les gouttes de NH3. Pour que les gouttes s'évaporent, l'énergie nécessaire est prise aux gouttes elles-mêmes qui donc se refroidissent.
-Pourquoi les gouttes se vaporisent alors qu'elles se refroidissent en même temps?
C'est l'effet de la dilution de NH3 autour des gouttes et donc de la perturbation de l'équilibre liquide/vapeur. En effet Patm= Pair + P_{NH3}. Si Pair augmente, P_{NH3} diminue
et devient inférieur à $P_{vap,NH3}(T)$, donc la goute se vaporise et refroidit.