

Travaux dirigés # 4 – Changements de phase

Thèmes abordés :

- Changement de phase liquide $\leftrightarrow$ gaz
- Chaleur latente
- Travail utile

EXERCICE 1 - Thermodynamique de la salle de bain

Pour se réveiller le matin, rien de tel qu'une bonne douche !

La salle de bain considérée a pour dimensions $2\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 2\text{ m}$. Son volume est noté V . La masse molaire de l'eau est 18 g.mol^{-1} , la masse volumique de l'eau liquide sera prise égale à 1000 kg.m^{-3} et la valeur de la constante des gaz parfaits sera prise à $R = 8,314\text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$.

La pression de vapeur saturante de l'eau est donnée dans le tableau ci-dessous aux températures de 0°C , 20°C et 40°C .

$T(^{\circ}\text{C})$	0	20	40
$P_{sat}(\text{bar})$	0.00611	0.025	0.075

- 1) Qu'est-ce que la pression de vapeur saturante (notée par la suite P_{sat}) ? De quelle(s) variable(s) thermodynamique(s) dépend-elle ?
- 2) Dans le cas d'un équilibre liquide / vapeur en présence d'une atmosphère inerte, que se passe-t-il si, à un instant donné, l'état du système est tel que :
 - a. $P_{H_2O} > P_{sat}$?
 - b. $P_{H_2O} < P_{sat}$?
 - c. $P_{H_2O} = P_{sat}$?
- 3) A l'équilibre, quelle est la valeur maximale de la quantité de matière n_{max} d'eau sous forme vapeur dans la salle de bain à la température T ? On donnera l'expression de n_{max} en fonction de T, V, P_{sat} et R .

L'humidité relative HR d'un gaz humide à la température T est définie comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau dans ce gaz humide et de la pression de vapeur saturante P_{sat} à la même température.

- 4) Exprimer HR en fonction du nombre de moles présent sous forme gazeuse dans la salle de bain n_{H_2O} et n_{max} définit à la question précédente.

Pour ne pas avoir froid en sortant de la douche, on a l'habitude d'allumer le chauffage dans la salle de bain. De plus, on prend souvent une douche bien chaude, pendant longtemps. Une fois la douche terminée, la température dans la pièce est 40°C et l'humidité relative est égale à $HR = 0.9$ (soit 90%).

5) Quelle est le nombre de moles d'eau sous forme gazeuse (n_{H_2O}) dans la salle de bain à la sortie de la douche ?

En sortant de la salle de bain, le chauffage est coupé et la porte est refermée hermétiquement. La porte n'étant pas calorifugée, la salle de bain va s'équilibrer thermiquement avec le reste de l'appartement, maintenu à 20°C .

6) A l'équilibre thermique, à quelle humidité relative correspond la quantité de matière d'eau précédemment calculée ? Que va-t-il alors se passer ?

7) Caractériser l'« état » de l'eau dans la salle de bain le soir en rentrant (l'appartement est resté toute la journée à la température de 20°C). Calculer les valeurs de :

- a. l'humidité relative ;
- b. la masse d'eau présente sous forme liquide.

Une VMC double flux est installée dans la salle de bain afin d'améliorer son confort, notamment au niveau de la ventilation. Le principe est d'économiser de l'énergie en réchauffant l'air qui rentre dans l'appartement avec l'air qui en sort. En hiver l'air extérieur est froid (0°C) et humide ($HR = 0.65$). Lorsqu'il rentre dans l'appartement on considère qu'il est porté à la température de 20°C et que la pression partielle de l'eau dans l'air ne varie pas.

8) Quelle est l'humidité relative de l'air amené depuis l'extérieur une fois qu'il a été réchauffé à la température de l'appartement ? Conclure sur le confort apporté par la VMC.

Thermodynamique

EXERCICE 2 – Changement de phase liquide / gaz

Une masse de 2 g d'eau liquide est enfermée dans un cylindre fermé par un piston. Initialement, le cylindre est vide et a un volume de 10 litres (on négligera le volume d'eau liquide).

Dans un domaine de températures de 10 à 150°C, la courbe de coexistence de l'eau pure sous formes liquide et vapeur est assez bien décrite par la loi empirique de Duperray :

$$P_1(T) = P_0 \left(\frac{T-273}{100} \right)^4 = P_0 \left(\frac{t}{100} \right)^4 \text{ avec } P_0 = 1 \text{ atm.}, T \text{ en K et } t \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

On donne, à la pression atmosphérique :

- La capacité thermique massique de l'eau liquide : $C_l = 4.18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- La chaleur latente massique de vaporisation de l'eau : $l_v = A - B.T$, avec $A = 3334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $B = 2.9 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1) Le cylindre est maintenu à la température de 60°C. Calculer la pression d'équilibre P_i . Quelle masse d'eau liquide reste-t-il à l'équilibre ?

2) Par déplacement lent du piston, on augmente le volume en maintenant la température constante, jusqu'à un volume final $V_f = 10V_0$.

- Calculer la pression finale, P_f .
- Calculer le travail W_0 fourni au système lors de cette transformation. Calculer le travail utile.
- Calculer la chaleur Q_0 fournie au système lors de cette transformation
- Quelle est la variation d'entropie du système ?

On refait la même expérience, mais cette fois le cylindre contient initialement de l'air à la pression de 1 bar.

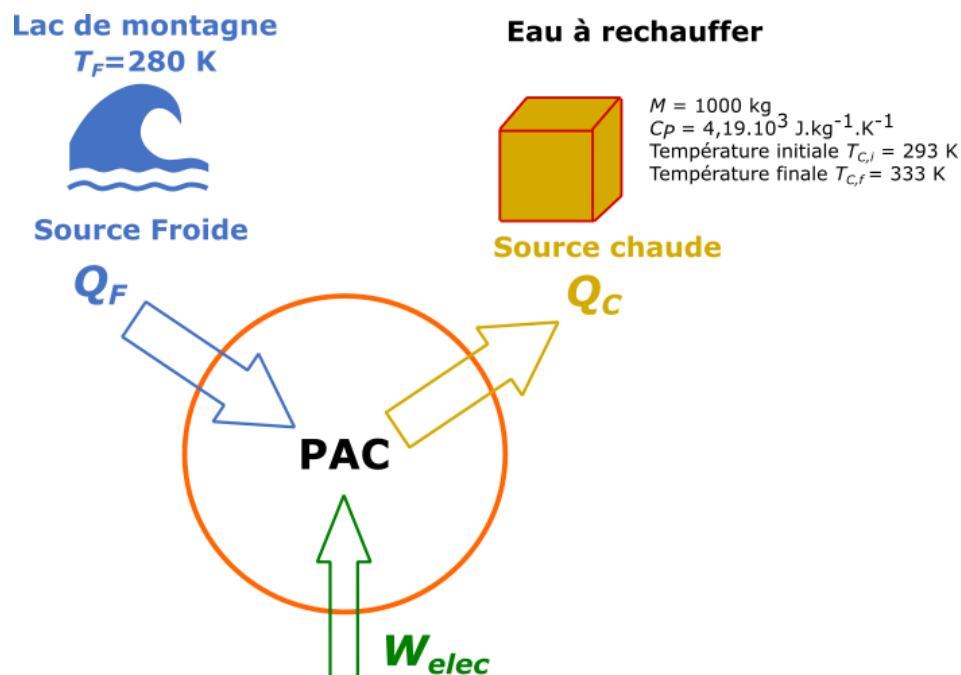
3) Calculer le travail W_1 nécessaire lorsqu'on fait passer réversiblement de façon isotherme (60°C) le système (2g d'eau + air) de V_0 à $10V_0$. Calculer le travail utile.

4) Calculer le travail utile lorsque la pression initiale de l'air est de 10 bars.

Travaux dirigés # 5 – Machines thermiques / Changements de phase

EXERCICE 1 – Pompe à chaleur air-eau

Une pompe à chaleur (PAC) dont le fonctionnement est supposé réversible échange de la chaleur avec 2 sources. La source froide est de l'eau d'un lac dont la température est $T_F = 280$ K. La source chaude est une masse d'eau $M = 1000$ kg thermiquement isolée dont la température initiale est $T_{C,i} = 293$ K.



La capacité thermique massique de l'eau à pression constante est $C_p = 4,19 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Calculer, lorsque la masse M d'eau a atteint la température finale $T_{C,f} = 333$ K :

- 1) La chaleur Q_C fournie à la source chaude.
- 2) Le travail électrique W_{elec} reçu par la PAC.
- 3) La chaleur reçue de la source froide Q_F .
- 4) La variation d'entropie de la source froide.
- 5) Le coefficient de performance (COP) de la PAC.

EXERCICE 2 - Préparation d'une boisson fraîche (d'après l'examen de Janvier 2015)



Un récipient contient une masse $m_0 = 0.4$ kg d'eau liquide à la température $T_0 = 25^\circ\text{C}$. On introduit dans le récipient une masse $m_g = 0.08$ kg de glace à la température $T_1 = -18^\circ\text{C}$. On fera l'hypothèse que la transformation est adiabatique (les parois du récipient sont isolées thermiquement) et isobare.

1) Calculer la température T_2 à l'équilibre thermodynamique dans l'hypothèse où $T_2 > 0^\circ\text{C}$. Pour cela :

- Justifier que l'enthalpie H est la fonction thermodynamique adaptée à ce problème.
- Etablir le bilan d'enthalpie de la transformation et en déduire T_2 .

2) Les cubes réfrigérants sont des cubes réalisés en matériaux comme le verre ou le granit que l'on stocke au congélateur et dont on se sert, à l'instar de la glace, pour rafraîchir une boisson.

- Déterminer la masse m_c de cubes réfrigérants, initialement à la température $T_1 = 18^\circ\text{C}$ qu'il faut introduire pour obtenir une température de mélange de $+6^\circ\text{C}$.
- En déduire le nombre de cubes que cela représente.

3) Partant des conditions initiales où le récipient contient $m_0 = 0.4$ kg d'eau à $T_0 = 25^\circ\text{C}$, on souhaite transformer 0.01 kg d'eau en glace en y introduisant des cubes réfrigérants.

- Quelle masse m'_c de cubes initialement à $T_1 = -18^\circ\text{C}$ doit-on introduire dans le récipient ?
- Que pensez-vous de l'utilisation d'un tel produit ?

Données :

Caractéristiques des cubes réfrigérants : coté $a = 2$ cm ; masse volumique : $\rho = 2650$ kg.m⁻³.

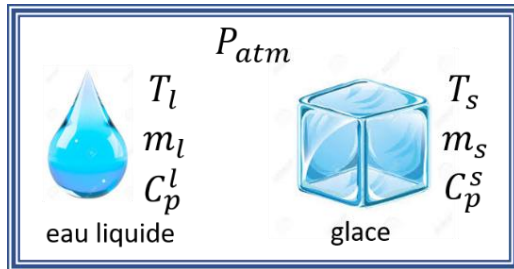
Capacités calorifiques massiques à pression constante (kJ.kg⁻¹.K⁻¹) :

- Eau liquide : $C_p^e = 4.19$.
- Eau solide (glace) : $C_p^g = a + bT = -0.001 + 0.01 T$ dans le domaine $250 \text{ K} < T < 273.15 \text{ K}$
- Cubes réfrigérants : $C_p^c = 0.7$.

Chaleur latente de fusion de la glace à 0°C et 1 atmosphère : $L_{fus} = 333$ kJ.kg⁻¹.

Thermodynamique

EXERCICE 3 - Mélange eau liquide / glace



On mélange m_l kg d'eau liquide à T_l (K) avec m_s kg de glace à T_s (K). La pression est constante ($P_{atm.}$) et l'ensemble est thermiquement isolé. On appelle T_f la température de fusion, on note C_p^l la capacité calorifique à pression constante du liquide, C_p^s celle du solide et L la chaleur latente massique de fusion ($J.kg^{-1}$).

- 1) Montrer que $\delta Q = dH$. Tracer $H = f(T)$ et $C_P = g(T)$.
 - 2) Ecrire le bilan enthalpique en supposant que la température après le mélange T_0 est telle que $T_0 > T_f$. En déduire T_0 .
 - 3) Ecrire le bilan enthalpique en supposant que la température après le mélange (T_0) est telle que $T_0 < T_f$. En déduire T_0 .
- On donne $T_l = 300$ K, $T_s = 260$ K, $T_f = 273$ K, $C_p^l = 4200 J.kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $C_p^s = 2000 J.kg^{-1} \cdot K^{-1}$ et $L = 300\,000 J.kg^{-1}$.
- 4) Calculer T_0 et en déduire la quantité d'eau et de glace après le mélange dans les cas suivants :
 - a. $m_l = 1$ kg ; $m_s = 0.1$ kg
 - b. $m_l = 0.01$ kg ; $m_s = 1$ kg
 - c. $m_l = 0.1$ kg ; $m_s = 1$ kg
 - d. $m_l = 1$ kg ; $m_s = 1$ kg
 - 5) Dans les cas où $T_0 = T_f$, calculer les quantités d'eau ou de glace transformées.

