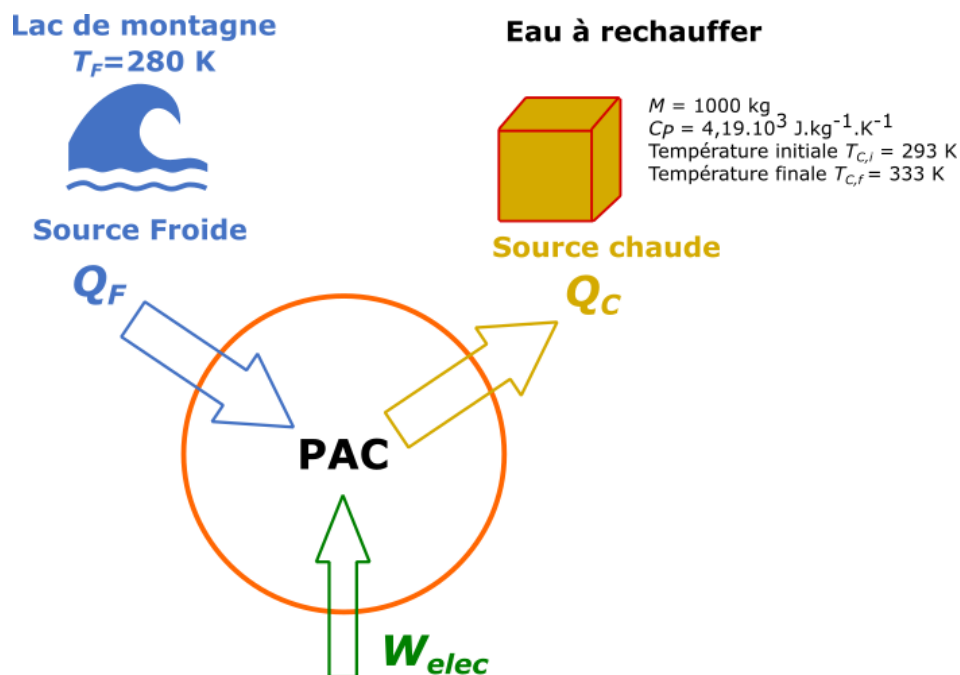


Travaux dirigés # 5 – Machines thermiques / Changements de phase

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.

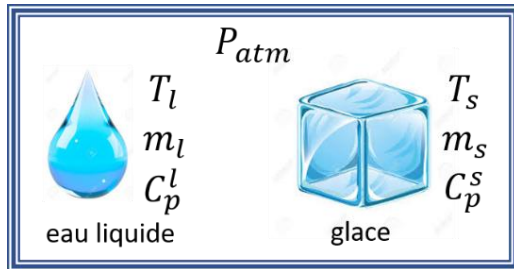
Capacités calorifiques massiques à pression constante (kJ.kg⁻¹.K⁻¹) :

- 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 ($J.kg^{-1}$).

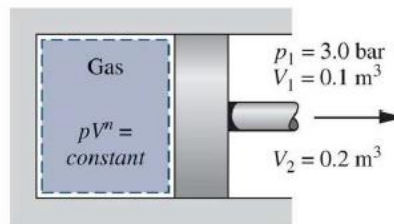
- 1) Montrer que $\delta Q = dH$. Tracer $H = f(T)$ et $C_p = g(T)$.
 - 2) Ecrire le bilan enthalpique en supposant que la température après le mélange T_0 est telle que $T_0 > T_f$. En déduire T_0 .
 - 3) Ecrire le bilan enthalpique en supposant que la température après le mélange (T_0) est telle que $T_0 < T_f$. 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.

Travaux dirigés # 6 – Révisions

EXERCICE 1 – Détente polytropique d'un gaz

Une transformation polytropique est une modification de l'état thermodynamique d'un système avec un échange thermique partiel entre ce dernier et son environnement. Le cas polytropique se classe donc entre le cas isotherme (échange thermique parfait) et le cas adiabatique (pas d'échange thermique). En thermodynamique, une transformation polytropique appliquée à un gaz (en général considéré comme un gaz parfait) est une transformation durant laquelle la pression P et le volume V du gaz considéré est de la forme $PV^n = \text{constante}$ où n est a priori quelconque.

Un gaz est contenu dans un cylindre fermé par un piston coulissant. Lors d'une détente polytropique de ce gaz, la pression initiale est 3 bar, le volume initial est 0.1 m^3 et le volume final est 0.2 m^3 .

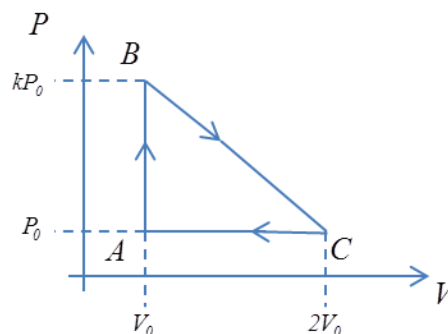


1) Déterminez le travail échangé durant la transformation dans les cas suivants :

- a. $n = 1.5$
- b. $n = 1$
- c. $n = 0$

EXERCICE 2 – Cycle de gaz parfait

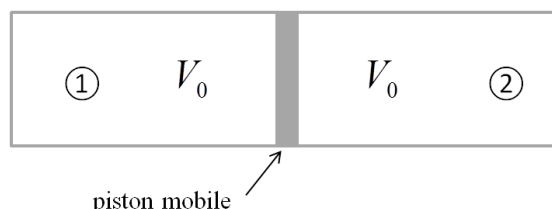
Un gaz parfait, de rapport $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$, subit le cycle de transformations mécaniquement réversibles représenté.



- 1) Pour quelle valeur de k le transfert thermique reçu lors de la transformation BC est-il nul ?
- 2) Cette transformation BC particulière peut-elle être qualifiée d'adiabatique ?

EXERCICE 3

Un cylindre est divisé en deux compartiments par un piston mobile. On supposera que toutes les transformations sont quasi-statiques.



A l'instant initial, le piston est bloqué pour délimiter deux compartiments de volume égaux V_0 . Dans le compartiment ①, on injecte de l'air (gaz parfait) à la pression P_{01} et à la température T_0 . Dans le compartiment ②, on injecte de l'air à la pression P_{02} et à la température T_0 , avec $P_{01} > P_{02}$.

L'ensemble est plongé dans un thermostat à la température T_0 et on libère le piston.

- 1) Soient n_1 et n_2 le nombre de moles d'air dans chacun des deux compartiments. Calculer $n_1 R$ et $n_2 R$.
- 2) Calculer l'état final de l'air dans chacun des deux compartiments ($P_1, P_2, V_1, V_2, T_1, T_2$).
- 3) Calculer le travail et la chaleur reçus par les deux fluides au cours de la transformation (W_1, W_2, Q_1, Q_2).
- 4) Donner le signe de chacun des termes W_1, W_2, Q_1 et Q_2 .

Les résultats des questions 1, 2 et 3 seront donnés uniquement en fonction de P_{01}, P_{02}, T_0 et V_0 .

EXERCICE 4 – Combustion du propane

- 1) Ecrire la réaction de combustion du propane C_3H_8 dans le dioxygène.
- 2) Calculer l'énergie dégagée par la combustion de 10 g de propane sachant que le pouvoir calorifique d'un alcane à n atomes de carbone est donné par :

$$Q = (662n + 260) \text{ kJ. mol}^{-1}$$

Cette combustion a servi à chauffer 3 kg d'eau, dont la température initiale est de 15°C .

- 3) Quelle est la température finale de l'eau ?

On donne la chaleur massique de l'eau $C_p = 4180 \text{ J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$.

Travaux dirigés # 7 – Effets thermoélectriques

Thème abordé :

- Thermoélectricité
- Thermocouples
- Effets Seebeck et Peltier

EXERCICE 1 – Mise en évidence de la loi des conducteurs intermédiaires

On cherche à mesurer la température d'une surface métallique par un thermocouple de type Chromel - Alumel à contacts séparés. Montrer que la mesure est indépendante de la nature de la surface métallique. Quel est l'avantage de cette mesure par rapport à une mesure par un thermocouple de type K du commerce.

EXERCICE 2

Proposer un montage permettant de mesurer la température absolue d'une surface par un thermocouple de type K en s'affranchissant du système de compensation de la carte d'acquisition.

EXERCICE 3 – Refroidissement et chauffage par effet Peltier

Calculer le COP d'un module à effet Peltier composé de 200 éléments en Tellure de Bismuth Bi_2Te_3 montés en série et présentant chacun un pouvoir thermoélectrique de $360 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. La résistance électrique interne du module vaut $R = 3\Omega$. Il est alimenté par un courant $I = 8\text{A}$.

On suppose que les températures des surfaces chaudes et froides sont maintenues respectivement à $T_C = 20^\circ\text{C}$ et $T_F = 5^\circ\text{C}$ par des thermostats. La résistance thermique du module Peltier $R_T = 2,4 \text{ K.W}^{-1}$.

Hypothèse : On admettra, ce qui est parfaitement exact, qu'un conducteur soumis à un dégagement de chaleur uniforme (comme l'effet Joule par exemple) peut être modélisé par analogie électrique par un milieu passif (résistance) avec deux sources de courant d'intensité moitié, localisées de part et d'autre du milieu.

EXERCICE 4 – Etude d'un générateur thermoélectrique à effet Seebeck

La Figure suivante donne les caractéristiques Tension-Courant et Puissance-Courant pour différentes résistances de charge R_g entre 1Ω et 100Ω d'un générateur thermoélectrique constitué de thermo-éléments de FeSi_2 , montés en série, d'un pouvoir thermoélectrique unitaire d'environ $360 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. les températures des surfaces chaudes et froides sont respectivement de $T_C = 607^\circ\text{C}$ et $T_F = 140^\circ\text{C}$.

4) Retrouver de ces courbes le nombre n de thermo-éléments, ainsi que la résistance électrique interne R_T du générateur.

5) Montrer que la courbe de puissance passe par un maximum lorsque l'on fait varier la résistance de charge R_g . Quelle est la relation entre la résistance électrique interne R_T du générateur et la résistance de charge R_g ? Conclure.

6) Pour le point de fonctionnement à P_{max} , exprimer les tension et courant correspondants en fonction de la tension à vide U_0 et le courant de court-circuit I_{max} .

