

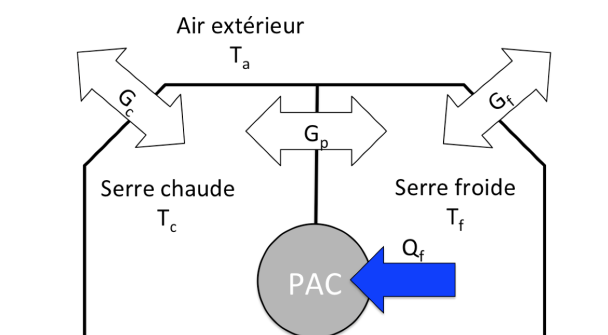
Physique II – Thermodynamique

Exercices 9

PROBLÈME I LES SERRES DE MADRID (TIRÉ EXAMEN 2017)

Le problème est inspiré des serres du jardin botanique royal de Madrid qui utilise un système très complexe de chauffage utilisant entre autre des pompes à chaleur (PAC) entre des serres chaudes et des serres froides. Le problème étudié ici est une version très simplifiée de l'ensemble des serres qui est très astucieusement conçue.

Nous considérons un système constitué d'une PAC installée entre deux serres, une tempérée froide à la température T_f et une tropicale chaude à la température T_c . Les serres sont également en contact thermique avec l'air extérieur à la température T_a .



Tous les calculs sont faits en régime stationnaire. On s'intéresse aux échanges durant un cycle de la PAC qui reçoit un travail mécanique W par cycle de durée τ . Elle échange la quantité de chaleur Q_f avec la serre froide et la quantité de chaleur Q_c avec la serre chaude. Les serres échangent aussi de la chaleur avec l'air extérieur, Q'_c et Q'_f pour les serres chaudes et froides respectivement.

Les échanges de chaleurs entre la serre chaude et froide d'une part et chaque serre avec l'extérieur sont caractérisées par la grandeur G , appelée conductance thermique qui regroupe tous les éléments entre les zones de température différentes. G_p est la conductance de la paroi entre les serres. G_c , respectivement G_f , les conductances de la serre chaude, respectivement froide, avec l'extérieur. On rappelle que le courant thermique transmis à travers ces éléments est

donné par

$$I_{th}^{2->1} = G(T_2 - T_1)$$

Les trois parties sont largement indépendantes.

A. Principe de fonctionnement de l'ensemble.

1. Indiquez sur le schéma le sens des échanges d'énergie entre les serres, la PAC et l'air extérieur pour W , Q_c , (Q_f est déjà indiqué sur le schéma)
2. En déduire que l'on a nécessairement $T_f < T_a < T_c$, ainsi que les sens de Q'_c et Q'_f à indiquer sur le schéma. (Justifiez)

B. Etude de la pompe à chaleur.

1. On considère une machine idéale réversible fonctionnant selon un cycle résistant ($W > 0$) qui échange par cycle la quantité de chaleur $Q_{f,id}$ avec la source froide, $Q_{c,id}$ avec la source chaude et reçoit le travail mécanique W . Rappeler la définition de l'efficacité de la PAC η_{id}^{PAC} et sa valeur en fonction de T_c et T_f . Ne pas donner seulement le résultat, expliciter le calcul.
2. L'efficacité de la PAC en service et indiquée par le fabricant est de $\eta_r^{PAC} = 6$. La norme utilisée pour donner l'efficacité d'une PAC est pour un fonctionnement entre $T_f = 15^\circ\text{C}$ et $T_c = 40^\circ\text{C}$. Comparer l'efficacité de votre PAC à celle d'une PAC idéale.

☐ $\eta_r^{PAC} > \eta_{id}^{PAC}$

☐ $\eta_r^{PAC} = \eta_{id}^{PAC}$

☐ $\eta_r^{PAC} < \eta_{id}^{PAC}$

3. Quelles affirmations sont correctes ?

☐ Le commerçant est malhonnête, une telle PAC ne peut pas exister.

☐ La PAC ne fonctionne pas selon un cycle de Carnot idéal.

- ☐ La PAC fonctionne avec des transformations quasi-statiques.
 - ☐ Certaines des transformations ne sont pas quasi-statiques.
 - ☐ On ne peut pas dire si les transformations sont quasi-statiques ou non.
 - ☐ La PAC fonctionne avec des transformations réversibles.
 - ☐ Certaines des transformations ne sont pas réversibles.
 - ☐ On ne peut pas dire si les transformations sont réversibles ou non.
4. On compare la PAC installée avec une PAC idéale, la PAC installée échange la quantité de chaleur Q_f par cycle avec la source froide, Q_c par cycle avec la source chaude et reçoit le même travail, W , que la PAC idéale. On pose $Q_c = Q_{c,id} + q$. En écrivant les deux principes de la thermodynamique montrez que $Q_f = Q_{f,id} - q$
 5. Exprimez l'entropie créée au cours d'un cycle, $S_{crée}$, dans la PAC installée en fonction de q , T_c et T_f . En déduire le signe de q , commentez.

C. Ensemble des deux serres

On s'intéresse maintenant au système constitué des deux serres. On désire établir les équations qui permettent de calculer T_c et T_f en régime stationnaire. On note G_c et G_f les conductances thermiques entre les serres chaude et froide et l'air extérieur, G_p la conductance thermique entre les deux serres. On considère une PAC idéale.

1. Obtenir les relations liant Q_c , Q_f , W , les conductances et la durée du cycle τ en faisant bilan des échanges d'énergie dans la serre chaude, la serre froide et la PAC. Prendre bien soin aux signes.
2. Ecrire l'égalité de Clausius (second principe) pour la PAC.
3. En déduire un système de deux équations à deux inconnues (T_c et T_f) qui permettent de calculer T_c et T_f en fonction de T_a , G_c , G_f et G_p et $P = \frac{W}{\tau}$ puissance de la PAC. On ne demande pas de le résoudre !

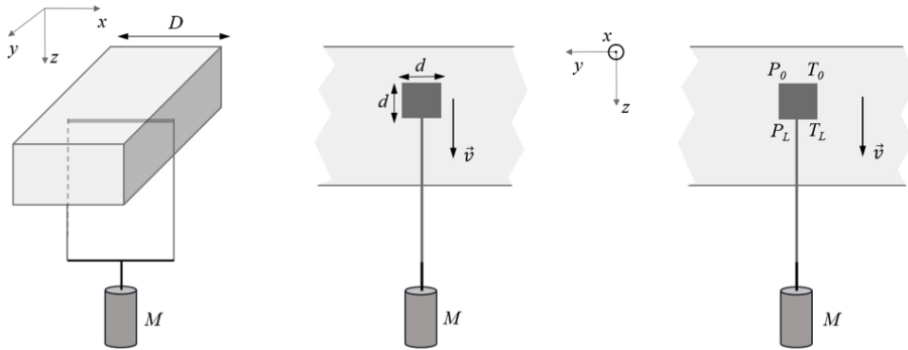
D. Questions conceptuelles

1. Comment feriez vous pour ajuster séparément T_c ou T_f ?
2. On s'intéresse aux cas $T_a < T_f < T_c$ ou bien $T_f < T_c < T_a$. Expliquez pourquoi on ne peut pas chauffer les serres correctement simplement en faisant fonctionner la PAC selon un cycle moteur ($W < 0$).
3. Proposez une autre configuration des échanges de chaleur entre la PAC, les serres et l'air extérieur pour réguler les températures des serres quand $T_a < T_f < T_c$ ou bien $T_f < T_c < T_a$.

PROBLÈME II LE FIL À TRAVERS LE BLOC DE GLACE (TIRÉ EXAMEN 2017)

Une expérience vue en cours consiste à faire traverser un fil à travers un bloc de glace sous l'effet d'un poids, le bloc de glace restant en un seul morceau.

Ce phénomène s'explique de la façon suivante : à l'instant t , la pression exercée par le fil change localement la température de fusion de la glace sous le fil qui peut devenir inférieure à 0°C . La glace peut alors fondre sous le fil. L'eau ainsi formée passe au-dessus du fil par les côtés, ce qui conduit à un déplacement du fil vers le bas. L'eau n'étant plus comprimée en haut du fil, elle gèle de nouveau. La chaleur latente de solidification est conduite à travers le fil ce qui entraîne la fusion de la glace sous le fil. Le processus recommence à $t + dt$, et ainsi de suite... le fil descend.



Notations de l'énoncé et rappels:

- M est la masse du poids accroché au fil (le fil a une masse négligeable par rapport à M).
- Le fil est de section carré et de côtés d . Sa conductivité thermique est λ .
- Le fil traverse le bloc de glace sur une largeur D .
- La pression exercée par le fil sur la glace est homogène sur toute la longueur D du fil.
- La vitesse v de déplacement du fil est constante.
- La fusion locale de l'eau à la base du fil a lieu à la température T_L et à la pression p_L .
- La solidification de l'eau en haut du fil a lieu à la température T_0 et à la pression p_0 .
- Le courant thermique à travers le fil est $I_{th} = \lambda \frac{S}{l} \Delta T$, avec S la section et l la longueur du fil à travers lequel le courant passe.
- Formule de Clapeyron pour une transition de phase de solide à liquide:

$$L_{f,m} = T(v_l - v_s) \frac{dp}{dT}$$

avec $L_{f,m}$ chaleur latente massique de fusion, T température, v_l et v_s volumes massiques pour les phases liquides et solides, et $p(T)$ la courbe définissant l'équilibre liquide/solide.

On notera que $v_l - v_s$ est une constante et $v_l < v_s$ pour l'eau.

- $\rho_s = \frac{1}{v_s}$ est la masse volumique de la glace et $\rho_l = \frac{1}{v_l}$ celle de l'eau
 - g est l'accélération de la pesanteur
1. Tracez de façon schématique le diagramme de phase $p(T)$ de l'eau. Reportez dans ce diagramme le point triple et le point critique. Indiquez où se trouvent les phases solide, liquide, et gaz.
 2. Le fil exerçant une pression sur la glace, placez les points (T_L, p_L) et (T_0, p_0) , sur le diagramme précédent. Comparez T_L et T_0 .

☐ $T_L > T_0$

☐ $T_L = T_0$

☐ $T_L < T_0$

3. Quelle est la direction du courant thermique I_{th} à travers le fil (du haut vers le bas, ou du bas vers le haut) ?
4. Exprimez le courant thermique I_{th} en fonction de D , λ , T_L et T_0 .
5. Calculez la différence de pression $dp = p_L - p_0$ en fonction de M , g , D et d . On rappelle que la vitesse de déplacement est constante.