

Réfrigérateurs.

Question 1 :

Un réfrigérateur ditherme fonctionne avec un fluide qui subit des transformations cycliques. Au cours d'un cycle, le fluide reçoit un travail W de l'extérieur, une chaleur Q_1 de la source froide de température T_1 (l'intérieur du réfrigérateur) et une chaleur Q_2 de la source chaude de température T_2 (le milieu ambiant). Préciser le signe de ces transferts mécanique et thermiques¹. Quelle égalité et quelle inégalité lient ces trois transferts ? Définir l'efficacité du réfrigérateur et montrer qu'elle est inférieure à une efficacité maximale qu'on exprimera en fonction uniquement des températures des sources. En donner une estimation numérique.

Pour un cycle, le premier principe, appliqué au fluide, on a

$$U_2 - U_1 = W + Q_1 + Q_2$$

or, par définition d'un cycle, l'état final est le même que l'état initial donc $U_2 = U_1$ et

$$W + Q_1 + Q_2 = 0$$

L'essence même du réfrigérateur est de refroidir son intérieur pour compenser les pertes thermiques, il y a donc transfert thermique de la source froide (l'intérieur) vers le fluide donc $Q_1 > 0$. Le moteur consomme de l'énergie électrique qu'il restitue au fluide en le comprimant donc $W > 0$. Le premier principe et sa conclusion ci-dessus ($Q_2 = -W - Q_1$) permettent d'affirmer que $Q_2 < 0$ (ce que l'on vérifie au toucher : le serpentin à l'arrière du réfrigérateur est plus chaud que l'air ambiant et le transfert thermique se fait du fluide vers la source chaude (l'air ambiant)).

De la même façon et avec, pour les mêmes raisons que plus haut, $S_2 = S_1$, le second principe permet d'affirmer que

$$S_2 - S_1 = 0 \geq \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}$$

Pour ceux que ce raccourci ne convainc² pas, détaillons

$$S_2 - S_1 \geq \oint_{\text{cycle}} \frac{\delta Q}{T_{\text{ext}}} = \int_{\text{échange 1}} \frac{\delta Q}{T_1} + \int_{\text{échange 2}} \frac{\delta Q}{T_2} = \frac{1}{T_1} \int_{\text{échange 1}} dQ + \frac{1}{T_2} \int_{\text{échange 2}} dQ = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}$$

Un rendement ou une efficacité est le rapport de la grandeur qui nous intéresse (ici la chaleur prélevée à la source froide, Q_1) à la grandeur que l'on investit (ici le travail mécanique W payé à E.D.F). Donc l'efficacité est $\eta = Q_1/W$. Comme elle ne fait intervenir que Q_1 et W , il s'agit d'éliminer Q_2 entre le premier et le second principes. On reporte donc $Q_2 = -W - Q_1$ dans l'inégalité

$$0 \geq \frac{Q_1}{T_1} - \frac{W + Q_1}{T_2}$$
$$\frac{W}{T_2} \geq Q_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = Q_1 \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

Après avoir vérifié que les différents facteurs qui apparaissent sont tous positifs, on peut en déduire

$$\eta = \frac{Q_1}{W} \leq \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

La température interne d'un réfrigérateur doit être basse sans toutefois geler les aliments donc être autour de 3°C (276 K) et, sauf en été, l'air ambiant à la maison est la température recommandée pour

¹Pour mécanique sans «s» et thermiques avec «s», je persiste et signe.

²je vains, tu vains, il vainc, ça surprend toujours un peu, non ?

économiser l'énergie soit 19°C, donc la différence de température est de 16 K et l'efficacité maximale théorique est 276/16=17,25. Les réfrigérateurs courants sont bien loin d'avoir cette efficacité.

Est-il utile de préciser qu'un réfrigérateur, disons d'efficacité 5, pour 1 kWh=3,6 MJ consommé par le moteur, enlève 5 kWh à la chambre froide et rejette à l'extérieur 1+5=6 kWh ?

Question 2 :

Un réfrigérateur «à absorption» (peu importe son fonctionnement interne, du reste particulièrement complexe) fonctionne de façon cyclique sans apport de travail mécanique mais au cours d'un cycle, il reçoit, outre les chaleurs précédentes, une chaleur Q_3 d'une source très chaude de température T_3 (la flamme d'un brûleur à gaz). Préciser le signe de ces transferts thermiques. Quelle égalité et quelle inégalité lient ces trois transferts ? Définir l'efficacité du réfrigérateur et montrer qu'elle est inférieure à une efficacité maximale qu'on exprimera en fonction uniquement des températures des sources.

En fait, il n'y a plus grand³-chose à faire. On reprend ce qui précède en supprimant le terme en W et en ajoutant les termes en Q_3

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$$

$$0 \geq \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3}$$

Pour l'efficacité, la grandeur intéressante est toujours Q_1 , mais cette fois la grandeur investie est la chaleur prélevée à la flamme du brûleur, soit Q_3 . Il faut toujours éliminer Q_2 , donc

$$Q_2 = -Q_1 - Q_3$$

$$0 \geq \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_1 + Q_3}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3}$$

$$0 \geq Q_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + Q_3 \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$Q_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \leq Q_3 \frac{T_3 - T_2}{T_3 T_2}$$

soit, après vérification que les signes sont bien positifs,

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_3} \leq \frac{T_1 (T_3 - T_2)}{T_3 (T_2 - T_1)}$$

Question 3 :

Pour T_1 et T_2 donnés, montrer que l'efficacité maximale du réfrigérateur à absorption est inférieure à celle du réfrigérateur classique, quelque élevée⁴ que soit la température T_3 . Quel peut donc être l'intérêt (pratique) d'un tel réfrigérateur ?

Pour le réfrigérateur classique, ditherme à moteur, l'efficacité maximale théorique est

$$\eta_2 = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

et pour le réfrigérateur tritherme sans moteur, elle est

$$\eta_3 = \frac{T_1 (T_3 - T_2)}{T_3 (T_2 - T_1)}$$

³En ancien français, les adjectifs en -and ou -ant avaient une forme commune au masculin et au féminin (comme en latin) d'où : grand-chose, grand-mère, grand-route, grand-voile, il en était de même pour le participe présent et comme c'est devenu trop difficile à expliquer que l'on devait écrire «ma sœur faisant ceci et cela», «mes frères faisant ceci ou cela»; «mes sœurs faisant...», le participe est devenu invariable malgré son statut de quasi-adjectif.

⁴Ou encore : quelle que soit la température T_3 . Ceci est un cours de français, il faut vraiment que je fasse tout !

On remarque aisément que

$$\eta_3 = \eta_2 \frac{T_3 - T_2}{T_3}$$

d'où l'on tire que $\eta_3 < \eta_2$ sans difficulté.

Quand à l'intérêt, il est évident : imaginez que vous partiez pour l'aventure absolue dans le Larzac profond avec un 4X4 dernier cri avec GPS, téléphone portable 3G avec email et internet, lecteur de DVD aux places arrière ; comment voulez vous faire les glaçons pour votre pastis vespéral ? : il n'y a pas de prise de courant !