Calculatrice autorisée

Exercice 1 : Refroidir une bouteille de vin

10 points

Déguster un vin à la bonne température est essentiel pour en apprécier les saveurs et les arômes : un vin trop tiède n'est pas agréable, un vin trop froid voit ses arômes masqués par l'alcool. Pour servir les vins à la bonne température, on utilise des caves à vin.

On s'intéresse à une bouteille de vin rouge dont la température idéale de service est de $16\,^\circ\mathrm{C}$. Initialement, la bouteille et son contenu sont à une température voisine de $24\,^\circ\mathrm{C}$. On place la bouteille dans une cave à vin. L'air à l'intérieur de la cave joue le rôle d'un thermostat : sa température T_{air} reste constante et égale à $12\,^\circ\mathrm{C}$.

On étudie l'évolution de la température T du système {vin + bouteille}, immobile, placé dans la cave dont l'air est ventilé. On note Q le transfert thermique entre l'air et le système, et Φ le flux thermique correspondant, c'est-à-dire le transfert thermique par unité de temps. Q et Φ sont comptés positivement si le transfert thermique a lieu de l'air vers le système. On suppose que le flux thermique Φ vérifie la loi phénoménologique de Newton.

Loi phénoménologique de Newton. Lorsqu'un système incompressible de température T est placé dans un fluide en écoulement à la température T_{a}, il s'établit entre le fluide (thermostat) et le système un flux thermique proportionnel à l'écart de température $(T - T_{\mathrm{a}})$:

$$\Phi = -h \times S \times (T - T_{\mathrm{a}})$$

où S est la surface d'échange entre le système et le thermostat (en m^2) et h le coefficient d'échange convectif (en $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$).

Données

- Surface d'échange entre la bouteille et l'air : $S = 5{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}^2$.
- Coefficient d'échange convectif : $h = 12\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$.
- Capacité thermique du système {vin + bouteille} : $C = 3{,}60\,\mathrm{kJ{\cdot}K^{-1}}$.
- $T(\mathrm{K}) = \theta(^\circ\mathrm{C}) + 273$.

1) À l'aide du premier principe de la thermodynamique, relier, en justifiant chaque étape, la variation d'énergie interne ΔU du système {vin + bouteille} au transfert thermique Q entre l'air et le système.

2) Exprimer le transfert thermique Q reçu pendant une durée très petite Δt en fonction du flux thermique Φ, supposé constant pendant cette durée, et de Δt. Rappeler les unités, dans le Système international, des grandeurs de cette expression.

3) Exprimer le flux thermique Φ en fonction de la capacité thermique C du système supposé incompressible, de sa variation de température ΔT et de la durée Δt.

4) En utilisant la loi phénoménologique de Newton, et en faisant tendre Δt vers 0, établir que l'équation différentielle qui régit l'évolution de la température T s'écrit :

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{\tau}\,(T - T_{\mathrm{air}})$$

En déduire l'expression de τ.

5) Montrer que τ est homogène à une durée.

6) Déterminer la valeur de τ.

7) On note T_0 la température du système à la date $t = 0$. Montrer que le modèle d'évolution temporelle de la température du système, solution de l'équation différentielle établie à la question 4, est :

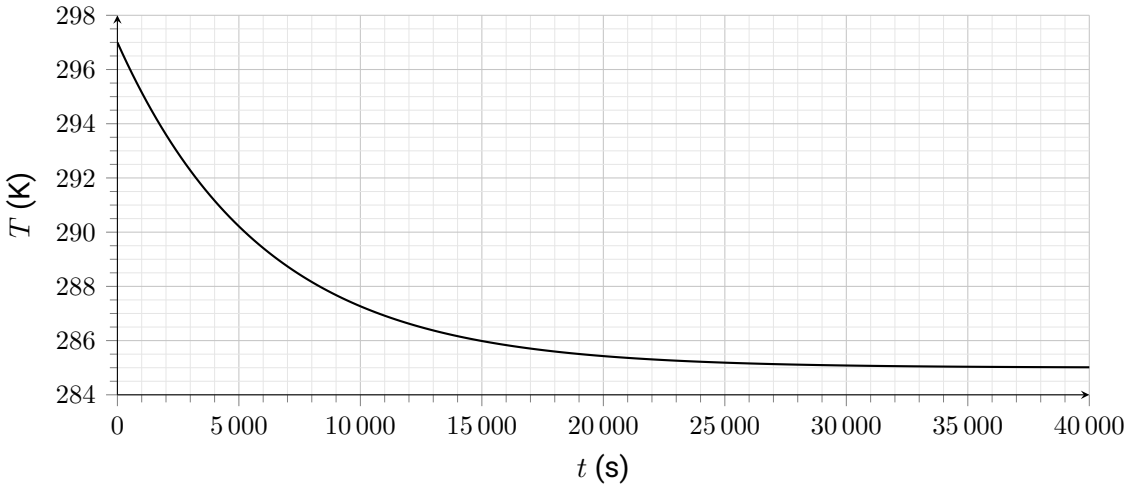
$$T(t) = (T_0 - T_{\text{air}})\,\mathrm{e}^{-t/\tau} + T_{\text{air}}$$

8) En déduire par le calcul au bout de combien de temps le vin pourra être servi à la température souhaitée de $16\,^{\circ}\mathrm{C}$.

9) La bouteille a été « oubliée » dans la cave. Estimer au bout de combien de temps elle a atteint la température de l'air de la cave. Justifier.

10) On imagine que le ventilateur de la cave tombe en panne. Quelle donnée parmi S, h et C est modifiée ? Augmente-t-elle ou diminue-t-elle ? Justifier.

11) L'évolution temporelle de la température $T(t)$ obtenue à la question 7 est représentée ci-dessous. Retrouver graphiquement les valeurs de T_0, T_{air} et τ. Des tracés et des explications sont attendus (à compléter sur le sujet).



Exercice 2 : Une pompe à chaleur pour chauffer une piscine

10 points

Les piscines sont souvent considérées comme énergivores. Leur consommation d'énergie peut pourtant être réduite en jouant sur leur forme, leur orientation et sur la source d'énergie utilisée pour leur chauffage. Les pompes à chaleur sont aujourd'hui recommandées pour chauffer ces bassins.

La pompe à chaleur. Une pompe à chaleur (PAC) est un équipement de chauffage thermodynamique qui transfère de l'énergie depuis une source renouvelable, appelée source froide (air extérieur, eau d'une nappe souterraine ou de la mer, sol), vers un autre milieu (logement, bassin d'eau…). Pour fonctionner, elle a toutefois besoin d'une source d'énergie, en général électrique : une PAC consomme donc de l'électricité.

Le coefficient de performance η d'une PAC est le rapport de l'énergie utile qu'elle fournit à l'énergie électrique qu'elle consomme. Plus il est élevé, plus l'énergie électrique nécessaire est faible par rapport à l'énergie prélevée à la source froide. Sa valeur est généralement comprise entre 2,5 et 5 ; elle dépend de la conception de la PAC et de la température de la source froide.

Schéma énergétique de la pompe à chaleur air/eau. La PAC air/eau est une machine thermique ditherme : elle fonctionne entre une source de température variable au cours du temps (l'air extérieur) et une source de température quasi constante (l'eau du bassin), tout en recevant de l'énergie électrique. Elle fonctionne de manière cyclique : au terme d'un cycle, la variation d'énergie interne ΔU du système {fluide frigorigène} contenu dans la PAC est nulle.

Au cours d'un cycle, trois transferts d'énergie ont lieu :

- Q_f : énergie transférée de l'air extérieur (source froide) au fluide de la PAC ; cette énergie est renouvelable et gratuite ;
- Q_c : énergie transférée par le fluide de la PAC à l'eau du bassin ;
- W_e : énergie électrique consommée par la PAC et transférée intégralement au fluide sous une autre forme.

Dans cet exercice, Q_f, Q_c et W_e sont des grandeurs positives, quel que soit le sens du transfert.

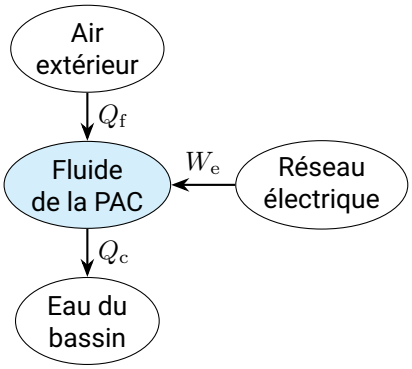


Figure 1 – Schéma énergétique

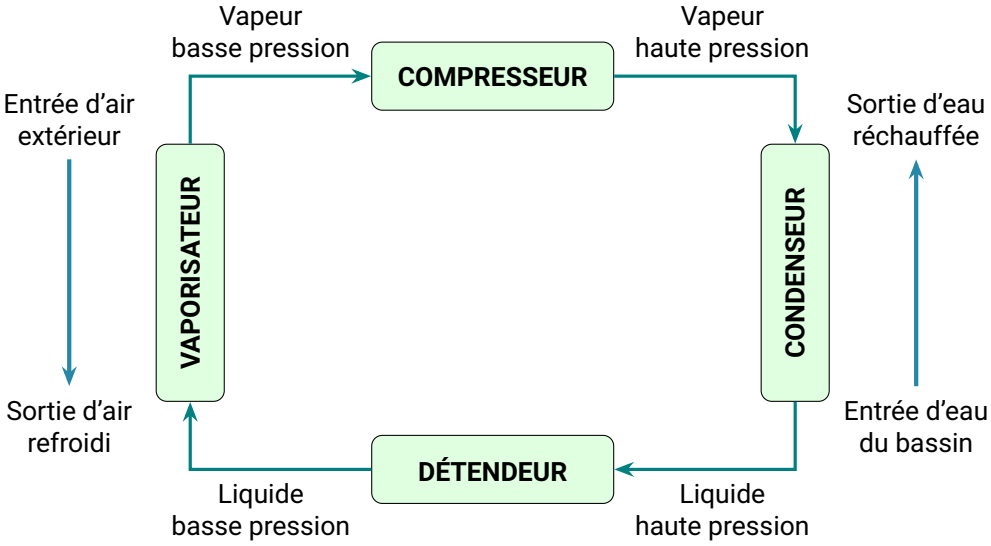


Figure 2 – Cycle du fluide frigorigène dans la PAC

Données

- Système étudié (sauf mention contraire) : le fluide frigorigène de la PAC.
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_\mathrm{eau} = 4{,}18\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$.
- Masse volumique de l'eau liquide : $\rho_\mathrm{eau} = 1{,}00 \times 10^3\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$.
- Constante des gaz parfaits : $R = 8{,}314\,\mathrm{J{\cdot}K^{-1}{\cdot}mol^{-1}}$; $T(\mathrm{K}) = \theta(^\circ\mathrm{C}) + 273$; $1\,\mathrm{bar} = 10^5\,\mathrm{Pa}$.

Partie A : fonctionnement global de la pompe à chaleur

1) Parmi les transferts d'énergie Q_c, Q_f et W_e, indiquer ceux qui correspondent à une énergie reçue par le fluide de la PAC et ceux qui correspondent à une énergie cédée par le fluide.

2) Appliquer le premier principe de la thermodynamique au fluide et montrer que, pour un cycle, on a l'égalité $Q_{\mathrm{c}} = Q_{\mathrm{f}} + W_{\mathrm{e}}$.

Partie B : étude du fluide frigorigène

Le fluide frigorigène est une espèce chimique choisie pour ses propriétés thermiques. Il circule dans des tuyaux à l'intérieur de la PAC et n'est donc jamais en contact direct avec l'air extérieur.

3) En expliquant brièvement, nommer le changement d'état que subit le fluide lors de son passage dans le vaporisateur. Lors de ce changement d'état, le fluide a-t-il reçu ou cédé de l'énergie ?

4) Citer les trois modes de transfert thermique et préciser celui qui a lieu principalement entre l'air extérieur et le fluide frigorigène.

Partie C : chauffage de l'eau du bassin d'une piscine

Une piscine de volume $V = 480\,\mathrm{m}^3$ est remplie avec une eau à la température de $16\,^{\circ}\mathrm{C}$. On souhaite porter la température de l'eau à $27\,^{\circ}\mathrm{C}$. On considère que le transfert thermique fourni par la PAC sert intégralement à chauffer l'eau de la piscine, sans déperdition.

5) Calculer la variation d'énergie interne ΔU_{eau} de l'eau du bassin quand sa température a atteint $27\,^{\circ}\mathrm{C}$. En déduire la valeur de Q_{c}, énergie transférée par le fluide de la PAC à l'eau du bassin.

6) L'énergie électrique consommée (et facturée) pendant ce chauffage vaut $W_{\mathrm{e}} = 6{,}0 \times 10^9\,\mathrm{J}$. Déterminer la valeur de Q_{f}, énergie transférée par l'air extérieur.

7) Exprimer, puis calculer le coefficient de performance η de la PAC.

Partie D : étude du gaz frigorigène, le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane

Le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane est l'un des fluides les plus utilisés dans les pompes à chaleur. Sa température d'ébullition est de $-26\,^{\circ}\mathrm{C}$ sous la pression atmosphérique.

8) D'après la figure 2, le fluide se trouve à des pressions différentes selon les zones du circuit. On considère qu'en un endroit il occupe, à l'état gazeux, un volume fermé de $200\,\mathrm{mL}$, sous la pression de $3{,}0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$ et à la température de $40\,^{\circ}\mathrm{C}$. En considérant que le gaz se comporte comme un gaz parfait dans ces conditions, déterminer la quantité de matière de 1,1,1,2-tétrafluoroéthane contenue dans ce volume.

9) Donner une interprétation microscopique de l'augmentation de la température d'un gaz.

10) Le gaz est maintenant comprimé et s'échauffe : il atteint, dans un volume considéré comme fermé, la pression de $30\,\mathrm{bar}$ à la température de $95\,^{\circ}\mathrm{C}$. Peut-on encore appliquer la loi des gaz parfaits ? Justifier en proposant une explication macroscopique et une explication microscopique.