Tracas matinal (Examen 2015)

Le système pour dégivrer la vitre arrière de votre voiture est constitué d'une résistance électrique qui dissipe une puissance $P = 300\,\mathrm{W}$ et d'un essuie-glace. Sur la face externe, il y a une couche de glace à $-10°\mathrm{C}$ de 0,5 mm d'épaisseur, alors que sur la face interne il y a une couche de buée (d'eau) de 0,05 mm d'épaisseur. La largeur l, la hauteur h et l'épaisseur w de la vitre sont de 1 m, 0,4 m et 5 mm respectivement. On suppose qu'un tiers de la puissance est dissipé dans le volume de la vitre, un tiers sur la face interne et le dernier tiers sur la face externe. On considère que toutes les parties sont isolées les unes des autres.

1. Calculez le temps t_{g-e} nécessaire pour enlever la couche de glace à l'extérieur.
2. Pour éliminer la buée, est-il nécessaire de chauffer l'eau et le pare-brise à $100°\mathrm{C}$?

   Oui / Non   Justifier votre réponse.

3. Calculez le temps t_{e-v} nécessaire pour enlever la buée à l'intérieur. On négligera la quantité de chaleur liée au changement de température de l'eau qui s'évapore.
4. Quelle est l'augmentation de température $\Delta T_{\mathrm{verre}}$ du pare-brise ? Supposez que le pare-brise ne reçoit qu'un tiers de l'énergie dégagée par le système de dégivrage, même après que toute la buée ait été évaporée.

   Données: Masse volumique de la glace : $\rho_g = 900\,kg\,m^{-3}$ *; chaleur spécifique de la glace :* $c_g = 2{,}0 \cdot 10^3\,J\,kg^{-1}\,K^{-1}$ *; chaleur latente de fusion de l'eau :* $L_f = 3{,}3 \cdot 10^5\,J\,kg^{-1}$ *; chaleur latente de vaporisation de l'eau (supposée indépendante de la température) :* $L_v = 2{,}3{\cdot}10^6\,J\,kg^{-1}$ *; masse volumique du verre :* $\rho_{verre} = 2{\cdot}10^3\,kg\,m^{-3}$ *; chaleur spécifique du verre :* $c_{verre} = 10^3\,J\,kg^{-1}\,K^{-1}$.

Solution

1. On a fait l'hypothèse que la puissance P dissipée par la résistance se répartit uniformément entre les trois composantes du pare-brise, à savoir le volume de verre et chacune des deux faces (nous avons une puissance de 100 W dissipée sur chacune des faces et dans la vitre). Toute l'énergie dissipée par la résistance (chaleur) sur la face externe du pare-brise est utilisée pour la transformation de la glace en eau. La chaleur dissipée par la résistance sur cette surface vaut donc :

   $$Q_r = \frac{P}{3} t_{g-e},$$

   où t_{g-e} est le temps durant lequel le chauffage reste allumé afin de faire fondre toute la glace en eau. La chaleur nécessaire pour la transformation de la glace en eau vaut :

   $$Q_{g-e} = \rho_g V_g c_g \Delta T_{g-e} + \rho_g V_g L_f.$$

   Le temps nécessaire au dégivrage du pare-brise sera donc, en sachant que $Q_r = Q_{g-e}$:

   $$t_{g-e} = \frac{3\rho_g V_g (c_g \Delta T_{g-e} + L_f)}{P}.$$

Application numérique:

$$\begin{aligned} t_{g-e} &= \frac{3 \times 900 \times 1 \times 0{,}4 \times 0{,}5 \cdot 10^{-3} \times (2{,}0 \times 10^3 \times 10 + 3{,}3 \times 10^5)}{300} \\ &= 630\, s \\ &= 10{,}5\, min. \end{aligned}$$

2. Il n'est pas nécessaire de chauffer le pare-brise et l'eau à 100°C pour évaporer cette dernière. En fait, la buée s'évaporerait même en l'absence de chauffage, pour autant que la pression partielle de vapeur d'eau p_{vap} dans l'habitacle de la voiture soit inférieure à la pression saturante p_{sat}. Tant que $p_{\text{vap}} < p_{\text{sat}}$, les phases liquide et gazeuse ne sont pas à l'équilibre, et l'eau s'évapore. L'effet du chauffage est d'augmenter la température de l'eau et donc p_{sat} (qui est une fonction monotone croissante de la température), de sorte à accoître la différence entre p_{vap} et p_{sat} et d'ainsi accélérer le processus d'évaporation. Vu que l'on ne chauffe que le pare-brise, l'augmentation de p_{sat} ne se fait que localement sur une mince couche au-dessus de celui-ci, à savoir sur la couche d'air qui est indirectement chauffée par le pare-brise. C'est pourquoi il est plus efficace de mettre la ventilation en marche, afin d'évacuer en permanence la couche saturée en vapeur d'eau qui se forme au dessus du pare-brise, et d'ainsi maintenir le déséquilibre entre p_{vap} et p_{sat}.
3. Cette fois-ci, toute l'énergie dissipée par la résistance sur la face interne du pare-brise est utilisée pour la transformation de la buée en vapeur. La chaleur dissipée par la résistance sur cette surface vaut :

$$Q_r = \frac{P}{3} t_{e-v}.$$

La chaleur nécessaire pour la transformation de la buée en vapeur vaut :

$$Q_{e-v} = \rho_e V_e L_v.$$

Le temps nécessaire au désembuage du pare-brise sera donc, en sachant que $Q_r = Q_{e-v}$:

$$t_{e-v} = \frac{3\rho_e V_e L_v}{P}.$$

Application numérique:

$$t_{e-v} = \frac{3 \times 1000 \times 1 \times 0{,}4 \times 0{,}05 \cdot 10^{-3} \times 2{,}3 \cdot 10^6}{300} = 460\, s \approx 8\, min.$$

4. Des questions précédentes on constate que la glace met plus longtemps à fondre que la buée à s'évaporer. La chaleur absorbée par le pare-brise durant toute la durée de fonte de la glace vaut :

$$Q_r = \frac{P}{3} t_{g-e}.$$

Cette chaleur est à l'origine de l'augmentation de température du pare-brise :

$$c_{\text{verre}}\, \rho_{\text{verre}}\, V_{\text{verre}} \Delta T_{\text{verre}} = Q_r,$$

d'où

$$\Delta T_{\text{verre}} = \frac{P\, t_{g-e}}{3\, c_{\text{verre}}\, \rho_{\text{verre}}\, V_{\text{verre}}}.$$

Application numérique:

$$\Delta T = \frac{300 \times 630}{3 \times 10^3 \times 2 \cdot 10^3 \times 1 \times 0{,}4 \times 5 \cdot 10^{-3}} = \frac{63}{4} \approx 16^\circ C.$$