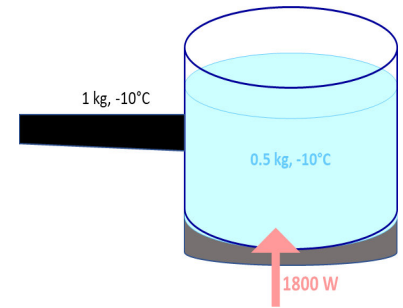


5-1 Dans une casserole de fer dont la masse vaut 1 kg, il y a 0.5 kg de glace. Le système a une température initiale de -10°C . On met la casserole sur une plaque chauffante dont la puissance est de 1800 W, jusqu'à ce que la glace ait été transformée en vapeur. En supposant les pertes de chaleur négligeables, calculer les quantités de chaleurs dégagées par la plaque pour les diverses étapes du processus, calculer aussi les durées.

Solution

Puisque le système passe d'un état de congélation à l'état de vaporisation, on sépare et calcule les étapes d'échauffement, de fusion et d'évaporation aux paliers et entre les paliers de 0°C et de 100°C .



$$c_{réc} = 460 [J/kg^{\circ}K] \quad c_{gl} = 2100 [J/kg^{\circ}K] \quad cf_{gl} = 330.10^3 [J/kg^{\circ}K] \quad cv_{eau} = 2.26.10^6 [J/kg^{\circ}K] !$$

E1 : Echauffement de la casserole et de la glace de -10°C à 0°C , durée :

$$\Delta Q = m_{réc} * c_{réc} * \Delta T + m_{gl} * c_{gl} * \Delta T = 15.1[kJ] \quad tP_{él} = \Delta Q \rightarrow t = \frac{\Delta Q}{P_{él}} = 8.4[s]$$

E2 : Fusion de la glace, durée : $\Delta Q = m_{gl} * cf_{gl} = 16.5[kJ] \quad t = \frac{\Delta Q}{P_{él}} = 92[s]$

E3 : Echauffement de la casserole et de la glace de 0°C à 100°C , durée :

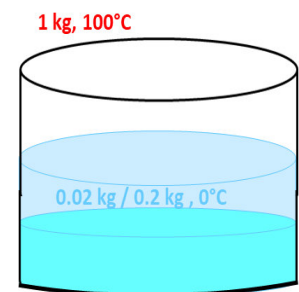
$$\Delta Q = m_{réc} * c_{réc} * \Delta T + m_{eau} * c_{eau} * \Delta T = 46000 + 209250[J] = 255.25[kJ] \quad t = \frac{\Delta Q}{P_{él}} = 142[s]$$

E4 : Vaporation de l'eau, durée : $\Delta Q = m_{eau} * cv_{eau} = 1.13.10^3[kJ] \quad t = \frac{\Delta Q}{P_{él}} = 628[s]$

5-2 On place un bloc de glace de masse m, à 0°C , dans un récipient de cuivre dont la masse est de 1 kg et la température de 100°C . Quel est l'état final du système dans les deux cas suivants :
a) m = 20g b) m = 200g

Solution

Le récipient de cuivre étant à 100°C , il transfère de la chaleur au bloc de glace, la quantité de chaleur fournie permet de faire fondre la glace et également d'élever la température de l'eau si elle est suffisante. On présuppose qu'il y a suffisamment d'énergie pour faire fondre la glace et élever la température de l'eau et l'on pose l'équation d'échange avec les trois contributions. Si la température finale obtenue est supérieure à 0°C , notre présupposition était exacte, l'énergie disposée par le cuivre dépasse la chaleur de fusion. Dans le cas contraire, on pose d'abord l'équation d'échange sans la part de chaleur participant à l'élévation de la température d'eau avec pour température finale de 0°C afin de déterminer la masse de glace fondue : ($c_{Cu} = 390[\frac{J}{kgK}]$)



a) $m = 0.02 \text{ [kg]}$

$$Q_L + \Delta Q_{eau} + \Delta Q_{cu} = m_{gl} * c_{f_{gl}} + m_{eau} c_{eau} (T_{fin} - T_{eau}) + m_{Cu} c_{Cu} (T_{fin} - T_{Cu}) = 0 \Rightarrow$$

$$T_{fin} = \frac{m_{eau} c_{eau} T_0 + m_{Cu} c_{Cu} T_{Cu} - m_{gl} * c_{f_{gl}}}{m_{eau} c_{eau} + m_{Cu} c_{Cu}} = 341.55 [^\circ K] = 68.4 [^\circ C]$$

b) $m = 0.2 \text{ [kg]}$

$$Q_L + \Delta Q_{eau} + \Delta Q_{cu} = m_{gl} * c_{f_{gl}} + m_{eau} c_{eau} (T_{fin} - T_{eau}) + m_{Cu} c_{Cu} (T_{fin} - T_{Cu}) = 0 \Rightarrow$$

$$T_{fin} = \frac{m_{eau} c_{eau} T_0 + m_{Cu} c_{Cu} T_{Cu} - m_{gl} * c_{f_{gl}}}{m_{eau} c_{eau} + m_{Cu} c_{Cu}} = 251.15 [^\circ K] = -22 [^\circ C]$$

On repose l'équation comme mentionné :

$$Q_L + \Delta Q_{cu} = m_f * c_{f_{gl}} + m_{Cu} c_{Cu} (T_0 - T_{Cu}) = 0 \Rightarrow$$

$$m_f = \frac{m_{Cu} c_{Cu} (T_{Cu} - T_0)}{c_{f_{gl}}} = 0.118 [Kg] \Rightarrow m_{gl} = 0.2 - 0.118 = 0.082 [Kg]$$

La température finale étant de $0^\circ C$, elle ne peut évidemment pas être inférieure, compte tenu des conditions de départ, ni inférieure étant donné la présence de la glace.

5-3 Dans un récipient d'aluminium ayant une masse de 200g et contenant un demi-litre d'eau à $20^\circ C$, on place 40g de glace à $-10^\circ C$. Quelles sont les caractéristiques de l'état d'équilibre.

$$c_{f_{gl}} = 330.10^3 [J/kg^\circ K] \quad c_{Al} = 900 [J/kg^\circ K] \quad !$$

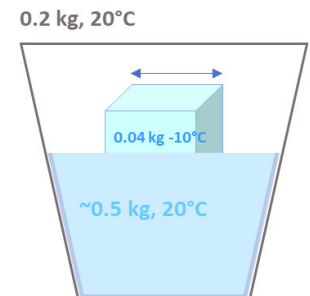
Solution

On procède comme dans l'exercice précédent, en présupposant que l'énergie fournie par le récipient et l'eau suffisent à faire fondre la glace. On pose alors l'équation d'équilibre à 5 membres et selon que la température finale obtenue est supérieure ou non à $0^\circ C$, on reformule l'équation. Il ne faut pas oublier que la glace suit 3 processus, l'élévation de sa température de $-10^\circ C$ à $0^\circ C$, la fusion et l'élévation de $0^\circ C$ à la température finale

$$\Delta Q_{gl} + Q_L + \Delta Q_{eau} + \Delta Q_{Al} = m_{gl} c_{gl} (T_0 - T_{-10}) + m_{gl} * c_{f_{gl}} + m_{gl} c_{eau} (T_{fin} - T_0) + m_{eau} c_{eau} (T_{fin} - T_i) + m_{Al} c_{Al} (T_{fin} - T_i) = 0 \Rightarrow$$

$$T_{fin} = \frac{-m_{gl} c_{gl} 10 - m_{gl} * c_{f_{gl}} + m_{gl} c_{eau} T_0 + m_{eau} c_{eau} T_i + m_{Al} c_{Al} T_i}{m_{gl} c_{eau} + m_{eau} c_{eau} + m_{Al} c_{Al}} = 286 [^\circ K] = 12.87 [^\circ C]$$

La masse de glace étant très faible en comparaison de la masse d'eau à $20^\circ C$, on pouvait s'attendre à ce que la température finale soit bien supérieure à $0^\circ C$.



5-4 On met en contact 1 kg d'eau à 10°C et 1 kg de glace à -10°C. Déterminer les caractéristiques de l'état d'équilibre. $cf_{gl} = 330.10^3 [J/kg^\circ K]$ $c_{gl} = 2100 [J/kg^\circ K]$

On peut à nouveau se référer aux problèmes précédents. Ici la quantité de glace est importante. L'énergie contenue dans un équivalent en masse d'eau ne suffira certainement pas à faire fondre toute la glace, étant donné qu'il faut de l'énergie pour élever la température de 10 °C, la chaleur massique de la glace étant la moitié de celle de l'eau il faudra encore de l'énergie pour la faire fondre, compte tenu de la chaleur de fusion de l'ordre de 10 x plus élevé que la chaleur massique de l'eau, on s'attend donc à ce qu'il reste de la glace à l'état d'équilibre, donc la température finale sera de 0°C. Pour procéder plus simplement calculons d'abord la quantité de chaleur nécessaire à élever la température de la glace et à la faire fondre. Puis calculons la quantité de chaleur tirée de l'eau passant de 10° à 0°C et comparons les résultats.

Solution

$$\Delta Q_{gl} + Q_L = m_{gl}c_{gl}(T_0 - T_{-10}) + m_{gl} * cf_{gl} = 21 + 330[KJ] = 351[KJ]$$

$$\Delta Q_{eau} = m_{eau}c_{eau}(T_0 - T_{-10}) = 41.85[KJ]$$

On remarque donc que la chaleur contenue dans l'eau suffit à élever la température de la glace à 0°C et permet également de faire fondre une fraction de la glace, on pose l'équation qui nous permet de déterminer alors la quantité de glace fondue :

$$\text{L'énergie excédentaire : } \Delta Q_{eau} - Q_{gl} = 41.85 - 21[KJ] = 20.85[KJ]$$

$$\text{Masse de glace fondue : } m_{gl} = \frac{E_{exc}}{cf_{gl}} = \frac{20.85}{330} = 41.85 - 21[KJ] = 63.2[g]$$

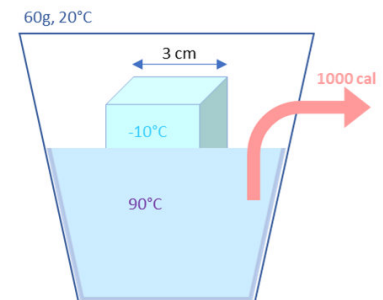
On a donc à l'équilibre un mélange de 935 g de glace et 565g d'eau à 0°C.

5-5 Un verre vide a une masse de 60g et une température de 20°C. On y verse 1 décilitre de thé à 90°C. Pour refroidir ce breuvage, on y met un petit cube de glace de 3cm de côté. Cette glace sort d'un congélateur où règne une température de -10°C. Calculer la température d'équilibre du système, en admettant que 100 calories sont perdues dans l'atmosphère.

$$cf_{gl} = 330.10^3 [J/kg^\circ K] \quad c_{gl} = 2100 [J/kg^\circ K] \quad c_v = 840 [J/kg^\circ K] \quad \rho_{gl} = 917 [kg/m^3]$$

Solution

On se retrouve dans une situation similaire aux problèmes précédents ; ici c'est seulement une partie de la chaleur fournie par le thé qui est communiquée au verre et à l'eau. La quantité de glace étant faible relativement à celle de l'eau à 90°C et à la masse du verre, on peut présupposer que la température d'équilibre sera supérieure à 0°C. Posons l'équation d'équilibre, en y retranchant la quantité de chaleur perdue.



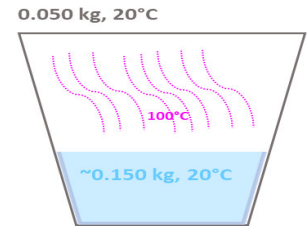
$$\Delta Q_{gl} + Q_L + \Delta Q_{egl} + \Delta Q_v + \Delta Q_{eau} - Q_{\nearrow} = m_{gl}c_{gl}(T_0 - T_{-10}) + m_{gl} * cf_{gl} + m_{gl}c_{eau}(T_{fin} - T_0) + m_v c_v (T_{fin} - T_v) + m_{eau}c_{eau}(T_{fin} - T_{eau}) = 0 \quad (m_{gl} = \rho_{gl} * V_{gl} = 0.024759kg) \Rightarrow$$

$$T_{fin} = \frac{-m_{gl}c_{gl}10 - m_{gl} * cf_{gl} + m_{gl}c_{eau}T_0 + m_v c_v T_v + m_{eau}c_{eau}T_i - 4185[J]}{m_{gl}c_{eau} + m_v c_v + m_{eau}c_{eau}} = 45.24[^\circ C]$$

5-6 Un verre a une masse de 50 g et contient 1.5 décilitre d'eau à 20°C. Quelle masse de vapeur d'eau à 100°C faut-il faire arriver dans ce verre pour élever sa température jusqu'à 60°C.

Solution

On se retrouve dans une situation similaire aux problèmes précédents ; la chaleur contenue dans la vapeur est communiquée au verre et à l'eau. En libérant de l'énergie cette vapeur se condense en eau au pallier d'évaporation et la température de l'eau formée descend jusqu'à la température d'équilibre et finale de 60°C. Posons à nouveau l'équation d'équilibre.



$$cv_{vap} = 2.26 \cdot 10^6 [J/kg^\circ K] \quad c_v = 840 [J/kg^\circ K]$$

$$Q_{vap} + \Delta Q_{ev} + \Delta Q_e + \Delta Q_v = m_{vap} * cv_{vap} + m_{vap} c_e (T_{fin} - T_i) + m_e c_e (T_{fin} - T_i) + m_v c_v (T_{fin} - T_i) = 0 \Rightarrow$$

$$m_{vap} = \frac{m_e c_e (T_{fin} - T_i) + m_v c_v (T_{fin} - T_i)}{cv_{vap} + c_e (T_{fin} - T_i)} = 11[g]$$

5-7 Déterminer expérimentalement à partir de quelle température un objet ne se couvre pas de buée lorsqu'on lui souffle dessus et en déduire le degré hygrométrique de l'air expiré par les poumons.

Solution

La buée se forme sur une surface lorsque la vapeur de l'air à proximité est saturée et qu'elle cède de la chaleur à la surface suffisamment froide pour entraîner une condensation de la vapeur en eau. En effet, si cette surface est assez chaude, la condensation ne se fait pas ou brièvement.

Par ailleurs, plus la température de l'air porteur d'humidité est élevée plus la capacité en vapeur est importante, si bien qu'en contact avec un environnement plus froid, l'air chaud devient subitement sursaturé en eau entraînant la condensation.

On découvre par hasard le phénomène à la surface d'une tasse que l'on vient de remplir de boisson chaude ; lorsque l'on souffle dans la tasse immédiatement servie pour en refroidir le contenu, on remarque alors que la vapeur de l'haleine apparaît plus ou moins brièvement sur le bord de la tasse. La température à laquelle la vapeur se condense est le point de rosée.

Pour la déterminer, il suffit de faire l'expérience avec un récipient propre (nettoyé de couche de graisse et poussière) et de surface suffisamment grande pour une bonne visibilité en y versant de l'eau chaude et après un délai de refroidissement, mesurer à des intervalles de temps régulier, la température superficielle du bord et le temps de présence de la buée juste après avoir laissé très brièvement une trace en y soufflant dessus. On part du principe que l'on ne connaît pas la teneur en humidité de l'air pulmonaire, ni la température de rosée dans un premier temps. Lorsque la buée demeure au moins un petit laps de temps sur le bord du récipient, on peut supposer avoir atteint cette température.

Matériels :

Ici, pour des raisons de disponibilité on a fait des essais avec une boîte cylindrique de metal (aluminium, b. de café cloisonnée de 1-2mm) et un bocal de verre quasi-cylindrique de quelques millimètres d'épaisseur, tous deux d'environ 5 cm de diamètre et 13 cm de haut. L'essai avec deux matériaux permet par ailleurs de vérifier l'incidence éventuelle de ceux-ci sur la température mesurée. La température a été mesurée par un thermomètre IR, on a relevé la température de la surface de l'eau préalablement mélangée durant quelques seconde, puis celle de la surface du récipient.

La méthode de détermination de la température de rosée par chute de température présente plusieurs avantages, l'eau ayant une capacité calorifique élevée, elle atteint une température d'équilibre avec l'environnement après un temps très long, le gradient de température relatif au temps étant très faible, ceci permet de faire une mesure assez précise.

Sachant que la température de rosée est inférieure à la température de l'air pulmonaire (37°C), on a une valeur indicative à partir de laquelle on fait l'expérience. On peut également procéder dans le sens inverse, procéder par chauffage. Mais cette méthode présente des inconvénients comme de multiples mesures à effectuer en continue afin de ne pas manquer la température cible, des manipulations multiples de chauffage et d'homogénéisation de la température .etc.

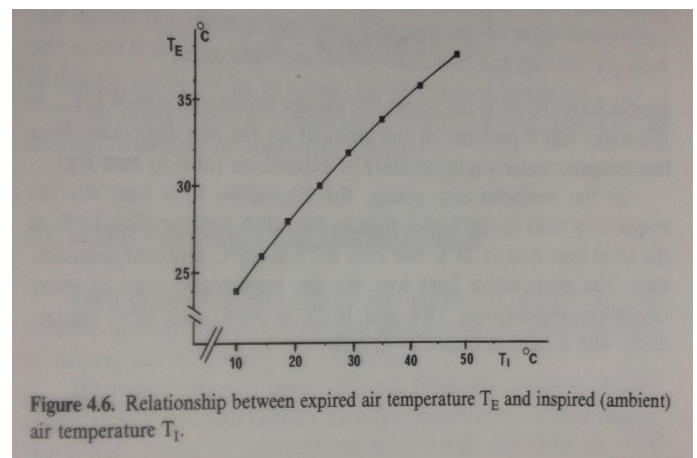
La pression correspondante à la température de rosée déterminée relevée sur le diagramme psychrométrique ou le rapport de l'humidité absolue à la température de rosée à celle à la température de l'air pulmonaire (présupposée à 37°C) donnent le degré hygrométrique de l'air pulmonaire qui comme on pourrait s'attendre devrait être relativement élevé.

On compare la valeur obtenue avec une valeur de référence trouvé dans un manuel de physiologie ou en ligne. On discute des résultats.

Discussion sur les valeurs attendues :

L'air alvéolaire est connu pour être saturé, toutefois il peut perdre cette humidité en cours de diffusion à travers les voies respiratoires. Inversement, la teneur en eau dépendant de la température de l'air, elle est maximale à haute température. Des mesures expérimentales ont montré que la température de l'air expiré dépend de celle de l'air inspiré, si bien que la teneur en eau dépendra de la température de l'air inspiré et sera plus élevée à mesure que la température baisse en cours d'expiration. Le graphe reporté ici montre qu'à la température inspirée à 25°C celle expirée avoisine 30°C (Human body temperature, p. 79 ; Houda et Ring). Les résultats obtenus au cours de l'expérience s'approchent de cette valeur, $T^{\circ}\text{C}$ air étant de 23°C (HR 55% ? , valeur perdue).

Discussion sur les valeurs attendues :



Dans notre expérience, à la température de l'air à 23°C (HR 55% ?, valeur perdue) , la température de surface à partir de laquelle de la buée se forme avoisine 31°C (limite arbitraire de présence de buée étant choisi à 1-2 secondes). L'expérience a commencé avec une température voisine de 70°C. Cet écart posé a entraîné une perte de temps, compte tenu des informations que l'on avait de la température maximale de l'air pulmonaire qui ne peut être supérieure à 40°C en situation normale et du fait que le point de rosée est nécessairement majorée par cette valeur. On note que la différence de matériau a une influence négligeable sur la température de la surface du récipient, donc de la température de rosée. Le calcul de l'humidité relative a été effectuée à partir d'une table des valeurs absolues de teneur en eau en fonction des températures. A 31°C, l'humidité absolue est de 32 g/L, celle présumée de 37°C de l'air alvéolaire est de 44 g/L, on obtient alors une humidité maximale de 73% . Le rapport des pressions donne évidemment le même résultat.

La différence de temps de présence de condensation selon la force de l'expiration sur la température d'apparition est aussi négligeable, valeurs non reportées ici. Ce qui change, c'est principalement l'étendue de la buée et le temps de présence, mais non la température à laquelle elle apparaît. L'expérience a été répétée de manière succincte avec un petit bocal de verre, la température de l'air étant de 23°C également, HR de 48%, la température de condensation étant à 1°C près proche de la première expérience.

En conclusion, l'hygrométrie maximale de l'air expiré est d'environ 70%, inférieure à l'hygrométrie alvéolaire. Donc en cours d'expiration de l'humidité est perdue, l'air semble arriver à une moyenne entre 100% d'humidité et celle de l'air ambiant. Toutefois, il faut noter que la température passe de 37°C à 30°C avec une teneur initiale de saturation de 44 g/L, donc dans un sens opposé, l'air se sature d'eau au fur et à mesure de sa sortie. Il est difficile d'estimer la participation de ce phénomène dans l'hygrométrie finale et même la légitimité de cette influence se pose également si l'on tient compte du fait que le petit volume d'air expiré à une vitesse importante ne se refroidit pas de manière instantanée. On peut envisager la même expérience de mesure effectuée en période de canicule à Tamb de 37°C. Dans ce cas l'humidité de l'air expirée mesurée nous informe sur la seule perte d'hygrométrie le long des voies respiratoires supérieures ?
