

Donc $1 = 65 \times e^{-0,08t}$, donc :

$$t = \frac{\ln 65}{0,08} = 52 \text{ min}$$

➤ Conclusion

La température d'un corps laissé à l'air libre diminue sous forme d'une exponentielle décroissante. Dans le cas où la différence de température initiale entre l'eau et l'air est deux fois plus faible que précédemment, soit $T_0 = \frac{65}{2}$:

$$t' = \frac{\ln \frac{2}{65}}{-0,08} = 43 \text{ min}$$

Si la différence de température initiale entre le corps et l'air est deux fois plus faible, la durée la durée de refroidissement n'est pas deux fois plus courte.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 408

1 La proposition A est une bonne réponse. La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est l'énergie mécanique qui est égale à $E_c + E_{pp}$. La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A est une bonne réponse. La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est le flux thermique qui s'exprime en watt. La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour un système au repos, $E_c = 0$ donc : $E_{\text{total}} = E_{pp} + U$. La proposition B est une bonne réponse. La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour un système au repos : $\Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$ donc $\Delta E_{\text{tot}} = \Delta U$.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour un système incompressible, $W = 0$ donc $\Delta U = W + Q = Q$. La proposition B est une bonne réponse. La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour un système incompressible, $W = 0$ donc $\Delta U = W + Q = Q$.

5 La proposition A est une bonne réponse. La proposition B est une bonne réponse. La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'expression est incorrecte : le transfert thermique est proportionnel à une différence de température, pas de temps.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la conduction est un transfert thermique par contact.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car le flux thermique est le transfert thermique qui s'écoule par unité de temps.

7 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car le transfert thermique est orienté de la source chaude vers la source froide.

La proposition C est une bonne réponse.

8 Les propositions A et B ne sont pas des bonnes réponses car le flux thermique est le transfert thermique qui s'écoule par unité de temps et est, par définition, égal à $\frac{Q}{\Delta t}$.

La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A est une bonne réponse.

Les propositions B et C ne sont pas des bonnes réponses car, à chaque fois, l'expression est incorrecte.

10 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'expression est incorrecte.

La proposition C est une bonne réponse.

11 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

12 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

13 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases

p. 409

➤ 1. Premier principe de la thermodynamique

14 Cette eau peut être le siège d'une variation d'énergie sans que sa position ou sa vitesse soient modifiées. En effet, il existe une énergie propre à cette eau appelée énergie interne. Elle correspond à la somme de toutes les énergies qui existent, à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants : énergies cinétiques microscopiques et énergies potentielles microscopiques.

15 1. a. L'énergie interne d'un système est l'énergie propre du système. Elle correspond à la somme de toutes les énergies qui existent, à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants.

b. Les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles microscopiques sont les contributions microscopiques de l'énergie interne d'un système.

2. a. Les énergies cinétiques microscopiques sont liées à l'agitation thermique des particules qui constituent le système.

b. On associe ces énergies cinétiques microscopiques à la température.

3. a. Les énergies potentielles d'interaction sont liées aux interactions entre les particules qui constituent le système. Elles peuvent être des interactions intramoléculaires ou intermoléculaires.

b. Dans le cas d'un gaz comme l'air, les particules qui le constituent sont éloignées (comme pour tout gaz), donc les interactions intermoléculaires sont réduites et la contribution des énergies potentielles microscopiques à l'énergie interne est faible.

16 1. Les deux systèmes sont dans des états physiques différents (liquide ou gaz). Dans le liquide, les molécules d'eau sont très rapprochées : les énergies potentielles d'interaction prédominent devant les énergies cinétiques microscopiques. Dans le cas de la vapeur d'eau, c'est l'inverse.

2. Les deux systèmes ont la même température, donc les mêmes énergies cinétiques microscopiques. Dans l'eau liquide, les interactions intermoléculaires sont plus importantes que dans la vapeur car les molécules sont plus rapprochées. L'eau liquide compte donc en plus une importante énergie d'interaction : elle possède l'énergie interne la plus élevée.

17 1. Faux. Il faut ajouter son énergie interne U .

2. Vrai.

3. Faux. L'énergie n'est pas détruite mais transférée du système au milieu extérieur.

18 1.



2. a. Le système est au repos : sa position ou sa vitesse ne sont pas modifiées.

$$\Delta E_{\text{tot}} = \Delta U$$

D'après le premier principe de la thermodynamique :
 $\Delta U = W + Q$

b. ΔU : terme correspondant à la variation de l'énergie du système.

W, Q : termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

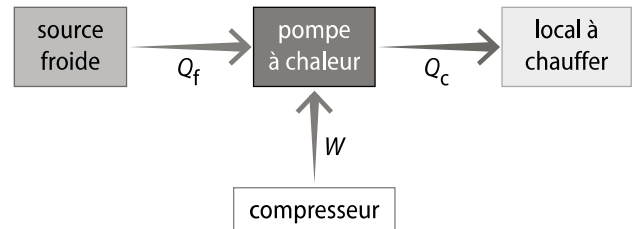
$$c. \Delta U = W + Q$$

W est reçu par le système, donc $W > 0$.

Q est cédé par le système, donc $Q < 0$.

$$\Delta U = 10 - 50 = -40 \text{ kJ}$$

19 1.



2. Le système est au repos car sa position ou sa vitesse ne sont pas modifiées.

$$\Delta E_{\text{tot}} = \Delta U$$

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = W_f + Q_f + Q_c$$

W et Q_f sont reçus par le système donc $W > 0$ et $Q_f > 0$.

Q_c est cédé par le système donc $Q_c < 0$.

2. Transferts et flux thermiques

20 1. $\Delta U = \rho \cdot V \cdot c_a \cdot (T_2 - T_1)$

AN : $\Delta U = 1,3 \times 400 \times 1\,000 \times (15,6 - 19,0)$
 $= -1,8 \times 10^6 \text{ J}$

2. $\Delta U < 0$ traduit une perte d'énergie de l'habitation.

21 1. $\Delta U_{\text{eau}} = Q = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta \theta$

$\Delta U_{\text{eau}} = 1,00 \times 0,250 \times 4\,180 \times (90 - 10)$
 $= 8,4 \times 10^4 \text{ J}$

2. On suppose que le four à micro-ondes est bien isolé. Toute l'énergie électrique est utilisée pour chauffer l'eau.

$$W_e = P \cdot \Delta t = \Delta U_{\text{eau}}$$

Donc $\Delta t = \frac{\Delta U_{\text{eau}}}{P} = \frac{8,4 \times 10^4}{900} = 93 \text{ s} = 1 \text{ min } 33 \text{ s}$

22 Il existe différents modes de transferts thermiques pour obtenir de l'eau chaude selon la façon dont l'énergie est transférée :

– le Soleil transfère de l'énergie par rayonnement sans support de matière ;

– l'air réchauffé par le Soleil transfère de l'énergie par conduction (support matériel mais non-déplacement de matière) au sac plastique qui, lui-même, transfère de l'énergie par conduction à l'eau ;

– l'eau à l'intérieur du sac plastique s'échauffe : l'énergie est transférée par convection au sein du liquide. L'eau dont la température est plus élevée monte vers la surface et celle de température moindre descend (il y a déplacement de matière).

23 1. Pour le système {café}, en l'absence de changement d'état et de transformation chimique :

$$\Delta U_{\text{café}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$$

$$\text{AN : } \Delta U_{\text{café}} = 1,0 \times 1,0 \times 4,18 \times (52 - 60) = -33 \text{ kJ.}$$

2. En supposant que la bouteille thermos est parfaitement isolée :

$$\Delta U_{\text{café+thermos}} = 0$$

$$3. \Delta U_{\text{café+thermos}} = \Delta U_{\text{café}} + \Delta U_{\text{thermos}} = 0$$

$$\text{Donc } \Delta U_{\text{thermos}} = -\Delta U_{\text{café}} = 33 \text{ kJ.}$$

24 1. Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide, donc ici de l'intérieur vers l'extérieur.

$$2. \text{ On a } \Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} \text{ donc } R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\Phi}.$$

Puisque Φ est le même pour les vitres et pour la lame d'air, on peut comparer directement les résistances thermiques à partir de ΔT . Ainsi, on voit que, pour le verre, ΔT est plus petit. La résistance thermique du verre est donc plus faible que celle de la lame d'air.

3. La résistance thermique de la lame d'air est supérieure à celle du verre, donc la lame d'air est un meilleur isolant thermique.

25 1. a. Le transfert thermique s'effectue de la source chaude vers la source froide, donc de la maison ($\theta_2 = 20^\circ\text{C}$) vers le grenier ($\theta_1 = 5,0^\circ\text{C}$) (et bien sûr vers l'extérieur).

$$b. \Phi = \frac{\theta_2 - \theta_1}{R}$$

$$\text{AN : } \Phi = \frac{20 - 5,0}{7,5 \times 10^{-3}} = 2,0 \times 10^3 \text{ W} = 2,0 \text{ kW}$$

2. a. Un bon choix de matériau pour un isolant thermique est un matériau qui a une conductivité thermique λ faible. Le polystyrène extrudé, qui a la conductivité thermique la plus faible, est un bon isolant thermique.

$$b. R_{\text{tot}} = R_{\text{sol}} + R_{\text{isolant}}$$

$$\text{Donc } R_{\text{isolant}} = R_{\text{tot}} - R_{\text{sol}} = 7,5 \times 10^{-2} - 7,5 \times 10^{-3} = 6,8 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$c. \text{ On doit avoir : } R_{\text{isolant}} = \frac{e}{\lambda \cdot S} \geq 6,8 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

$$\text{Donc } e \geq 6,8 \times 10^{-2} \times 0,033 \times 80 = 0,18 \text{ m.}$$

L'épaisseur minimale du panneau doit être de 18 cm

3. Deux lois thermiques

26 1. a. L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchiée et n'est donc pas absorbée. La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0,30$, ce qui signifie que la Terre réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit.

L'albédo a pour conséquence que le flux thermique reçu du Soleil à la surface de la Terre va diminuer.

b. La température est liée au flux thermique reçu, donc celle-ci est diminuée avec l'albédo.

2. a. Les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol. Ce phénomène s'appelle l'effet de serre.

b. Son effet est d'augmenter la température moyenne terrestre.

27 1. On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :

$$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$$

$$2. a. F = \sigma \cdot T^4 \text{ donc } \sigma = \frac{F}{T^4}.$$

$$F \text{ est en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ donc } \sigma \text{ est en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}.$$

$$b. \Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$$

$$\text{Donc } \sigma \cdot T^4 = F$$

$$\text{Soit } T = \sqrt[4]{\frac{F}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{342}{5,67 \times 10^{-8}}} = 279 \text{ K}$$

Cela correspond à 6°C .

3. Cette valeur diffère de la valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : elle réfléchit vers l'espace une partie (30 %) de l'énergie qu'elle reçoit (albédo de 0,30) et les gaz de l'atmosphère absorbent une partie (environ 20 %) du rayonnement émis par le sol (effet de serre).

28 1. Le système (café) cède de l'énergie à l'environnement.

$$2. T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$$

3. La solution générale de l'équation différentielle est :

$$T(t) = A \cdot e^{\gamma \cdot t} + B$$

$$\text{Quand } t \text{ tend vers l'infini, } T = T_{\text{amb}} \text{ donc } B = T_{\text{amb}}.$$

$$\text{À } t = 0 \text{ s, } T = T_0 \text{ donc } T_0 = A + T_{\text{amb}} \text{ donc } A = T_0 - T_{\text{amb}}.$$

Donc :

$$T(t) = (T_0 - T_{\text{amb}}) \cdot e^{\gamma \cdot t} + T_{\text{amb}}$$

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (75 - 25)e^{\gamma \cdot t} + 25$$

Donc :

$$T(t) = 50e^{\gamma \cdot t} + 25$$

4. a. Après 5 minutes, le café est à 50°C .

$$\text{Donc } T(5) = 50e^{\gamma \times 5} + 25 = 50$$

$$\text{Donc } e^{5\gamma} = \frac{1}{2}.$$

$$\text{Donc } 5\gamma = \ln \frac{1}{2}.$$

$$\text{Donc } \gamma = -\frac{\ln 2}{5}.$$

b. On en déduit l'expression générale de $T(t)$:

$$T(t) = 50e^{-\frac{\ln 2}{5}t} + 25$$

■ Faire le point avant d'aller plus loin ■ p. 411

► Citer les énergies microscopiques qui contribuent à l'énergie interne du système.

Les énergies cinétiques microscopiques sont liées à l'agitation thermique des particules qui constituent le système. Elles augmentent avec la température du système.

Les énergies potentielles d'interaction sont liées aux interactions entre les particules qui constituent le système. Elles peuvent être des interactions intramoléculaires ou intermoléculaires.

► Écrire le premier principe de la thermodynamique en explicitant chaque grandeur et son unité.

Le premier principe de la thermodynamique indique que si un système fermé au repos a son énergie qui varie, c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de travail (W), soit sous forme de transfert thermique (Q) :

$$\begin{array}{ccc} \text{variation} & & \text{transfert} \\ \text{d'énergie} & \longrightarrow & \text{thermique} \\ \text{interne} & & \text{(en J)} \\ \text{(en J)} & \longrightarrow & \Delta U = W + Q \\ & \uparrow & \\ & \text{travail (en J)} & \end{array}$$

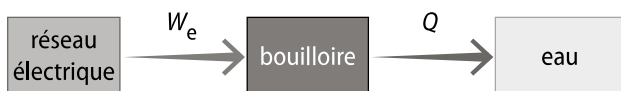
► Citer les modes de transferts thermiques et définir chacun d'entre eux.

La conduction est un transfert thermique par contact entre le système et l'extérieur.

La convection est un transfert thermique entre le système et l'extérieur par mouvement de matière au sein du système.

Le rayonnement est un transfert thermique qui se fait par le biais d'une onde électromagnétique.

► Effectuer un bilan d'énergie pour une bouilloire électrique.



W_e correspond à l'énergie reçue du réseau électrique par une bouilloire et l'énergie fournie à l'eau par celle-ci. Pour la bouilloire : $W_e > 0$ et $Q < 0$.

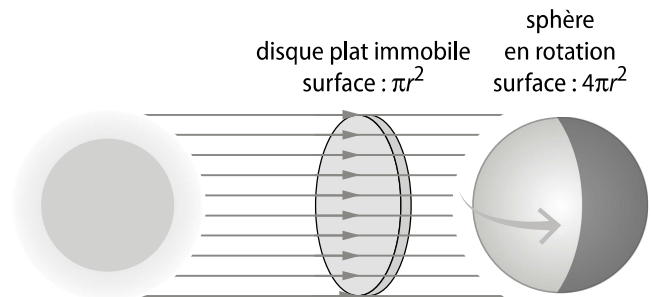
► Écrire la relation qui relie le flux thermique et le transfert thermique en explicitant chaque grandeur et son unité.

Le flux thermique Φ correspond au transfert thermique Q qui s'écoule entre deux milieux par unité de temps :

$$\begin{array}{ccc} \text{flux thermique} & \longrightarrow & \Phi = \frac{Q}{\Delta t} \\ \text{(en W)} & & \begin{array}{l} \text{transfert} \\ \text{thermique (en J)} \\ \text{durée (en s)} \end{array} \end{array}$$

► Expliciter les étapes qui permettent d'estimer la température moyenne terrestre à partir de la loi de Stefan-Boltzmann.

Le flux thermique reçu F au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$$\Phi = F \cdot \text{surface}(\text{disque}) = F' \cdot \text{surface}(\text{Terre})$$

$$\text{D'où } F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4 \pi \cdot r^2.$$

$$\text{Donc } F' = F/4.$$

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable, et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :

$$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$$

$$\text{Donc, d'après la loi de Stefan-Boltzmann, } \sigma \cdot T^4 = F'.$$

$$\text{Soit } T^4 = \frac{F'}{\sigma}.$$

► Écrire la relation qui lie le flux thermique et la variation de température d'un système en explicitant chaque grandeur et son unité.

Le flux thermique Φ est lié à la différence de température $T_c - T_f$ entre les deux milieux pour lesquels le transfert thermique se fait et à la résistance thermique R_{th} par la relation :

$$\begin{array}{ccc} \begin{array}{l} \text{température de la} \\ \text{« source chaude » (en K)} \end{array} & & \begin{array}{l} \text{température de la} \\ \text{« source froide » (en K)} \end{array} \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & T_c - T_f & \\ \text{flux thermique} & \longrightarrow & \Phi = \frac{T_c - T_f}{R_{th}} \\ \text{(en W)} & & \begin{array}{l} \text{résistance} \\ \text{thermique} \\ \text{(en K} \cdot \text{W}^{-1}) \end{array} \end{array}$$

► En utilisant la loi de Newton pour de l'eau fraîche qui se réchauffe à température ambiante, on a trouvé l'expression : $T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$. Quelles données expérimentales permettent de déterminer A et B ?

On peut déterminer A et B en connaissant la température initiale de l'eau fraîche T_0 et la température ambiante T_{th} .

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{th}$ donc $B = T_{th}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{th}$ donc $A = T_0 - T_{th}$.

Donc :

$$T(t) = (T_0 - T_{th}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{th}$$

Exercices similaires aux exercices résolus

■ p. 412 et 413

30 1. Le sauna reçoit une énergie $\Delta E = P \cdot \Delta t_{chauffe}$.

$$\text{AN : } \Delta E = 7,5 \times 60 = 4,5 \times 10^2 \text{ kJ}$$

2. Cette énergie est perdue en 5,0 minutes car la température est constante dans le sauna.

La puissance qui traverse la paroi est donc :

$$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t_{chauffe}}$$

$$\text{AN : } \Phi = \frac{450 \times 10^2}{300} = 1,5 \times 10^3 \text{ W} = 1,5 \text{ kW}$$

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

$$\text{AN : } R_{th} = \frac{80 \times 18}{1500} = 4,1 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

32 1. $T_{amb} = -5^\circ \text{C}$

2. La solution générale de l'équation différentielle (qui découle de la loi de Newton) est :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$ donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.

Donc :

$$T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$$

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (20 - (-5)) \cdot e^{-\gamma \cdot t} - 5$$

Donc $T(t) = 25e^{-\gamma \cdot t} - 5$.

3. a. À $t = 30$ min, $T(30) = 15 = 25e^{-30\gamma} - 5$.

$$\text{Donc } 25e^{-30\gamma} = 20.$$

$$\text{Donc } e^{-30\gamma} = \frac{4}{5}.$$

$$\text{Donc } -30\gamma = \ln \frac{4}{5}.$$

$$\text{Donc } \gamma = \frac{\ln \frac{5}{4}}{30}.$$

b. On en déduit l'expression générale de $T(t)$:

$$T(t) = 25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} t} - 5$$

4. On cherche le temps t pour lequel on a $T(t) = 37^\circ \text{C}$.

$$25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} - 5 = 37 \text{ soit } 25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} = 42 \text{ soit}$$

$$e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} = \frac{42}{25}$$

$$\text{D'où } -\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t = \ln \frac{42}{25}$$

$$t = -30 \times \frac{\ln \frac{42}{25}}{\ln \frac{5}{4}} = -70 \text{ min} = -1 \text{ h } 10$$

On en déduit l'heure du crime :

$$2 \text{ h } 20 - 1 \text{ h } 10 = 1 \text{ h } 10 \text{ du matin.}$$

S'entraîner pour maîtriser

■ p. 414

33 1. a. Il y a de la conduction entre le tube en métal et l'air présent dans le réfrigérateur, ainsi qu'un phénomène de convection de l'air à l'intérieur du réfrigérateur.

b. Il est préférable de le placer en hauteur car l'air chaud a tendance à monter et l'air froid à descendre par convection (car l'air froid est plus dense que l'air chaud).

2. a. Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide, donc de l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur.

$$\text{b. } \Phi = \frac{\Delta T}{R} = \frac{16}{0,89} = 18 \text{ W}$$

$$\text{c. } 1 \text{ an} = 365,25 \times 24 = 8\,766 \text{ h}$$

$$\Delta U = Q = \Phi \cdot \Delta t = 18 \times 8\,766 = 1,6 \times 10^5 \text{ Wh} = 1,6 \times 10^2 \text{ kWh}$$

34 1. Lorsque l'eau est agitée, on mesure une élévation de la température de l'eau. Cela s'explique au niveau microscopique car l'énergie cinétique microscopique de l'eau augmente.

2. Quand on actionne la tige, il y a transfert d'énergie par travail de la force de la palette sur l'eau.

3. Le système {eau + récipient} est immobile au départ et à la fin, donc seule l'énergie interne varie.

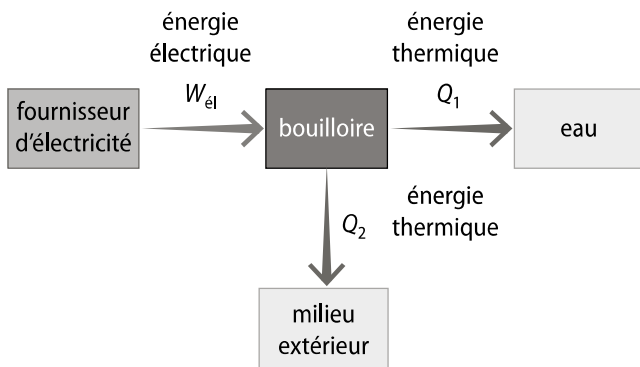
4.



$$\Delta U = W$$

5. Cette expérience montre que le travail d'une force est un mode de transfert thermique. Il remet donc en cause la théorie du calorique.

35 1.



$$2. \eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{dépensée}}} = \frac{Q_1}{W_{\text{el}}} = \frac{\rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T}{P \cdot \Delta t}$$

$$\text{AN : } \eta = \frac{1,0 \times 0,40 \times 4,18 \times 10^3 \times (85 - 18)}{1500 \times 80} = 0,93 = 93 \%$$

36 1. a. La température de l'eau augmente, donc son agitation thermique moléculaire (ou énergie cinétique microscopique) augmente. Son énergie interne va ainsi augmenter.

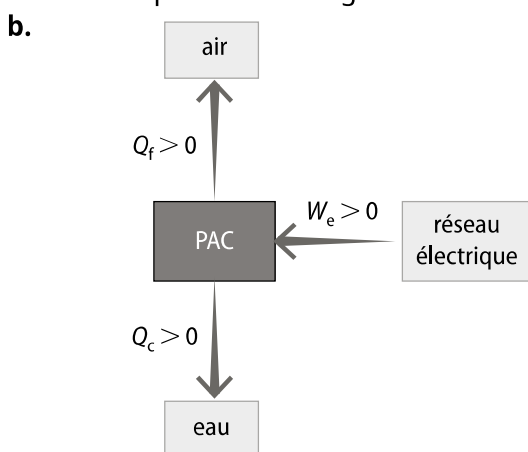
b. Pour le système {eau}, $\Delta U_{\text{eau}} = m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$, où ΔT est la variation de la température de l'eau.

$$\text{AN : } \Delta U_{\text{eau}} = 10,0 \times 10^3 \times 4,18 \times 10^3 \times (27 - 10) = 7,1 \times 10^8 \text{ J}$$

c. La piscine est couverte et n'échange pas d'énergie avec l'extérieur, donc l'augmentation de l'énergie interne de l'eau provient du flux thermique reçu de la PAC :

$$Q_{\text{PAC}} = \Delta U_{\text{eau}} = 7,1 \times 10^8 \text{ J}$$

2. a. La source froide est l'air qui reste à température constante. La source chaude est la piscine dont la température va augmenter.



c. Coefficient énergétique :

$$\eta = \frac{Q_{\text{PAC}}}{W_e} = \frac{7,1 \times 10^8}{2,4 \times 10^8} = 3,0$$

d. Pour obtenir la même température par un chauffage direct sans source froide, le système aurait dû prélever $W_e' = Q_{\text{PAC}} = 7,1 \times 10^8 \text{ J}$ directement au réseau électrique.

e. La PAC est 3 fois plus performante qu'un système de chauffage électrique classique.

37 Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface F (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) d'un objet et la température T (en K) de l'objet considéré comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit :

$$F = \sigma \cdot T^4 \text{ donc } T^4 = \frac{F}{\sigma}$$

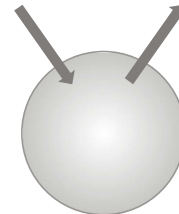
$$\text{AN : } T^4 = \frac{800}{5,67 \times 10^{-8}} = 1,41 \times 10^{10} \text{ K}^4$$

$$\text{Donc } T = 345 \text{ K} = 72 \text{ }^\circ\text{C}.$$

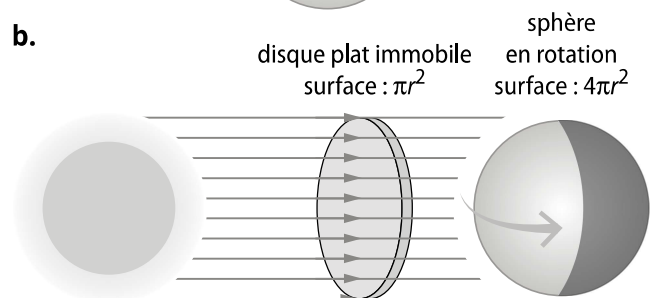
La différence de température vient du fait que le fond du panneau n'est pas un « corps noir » et ne réémet donc pas toute l'énergie qu'il reçoit.

38 Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.

1. a. puissance reçue puissance émise



b.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de Vénus :

$$\Phi = F \cdot \text{surface}(\text{disque}) = F \cdot \text{surface}(\text{Vénus})$$

$$\text{Donc } F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$$

$$\text{Donc } F' = \frac{F}{4} = \frac{2800}{4} = 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

2. a. L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par Vénus qui est réfléchi et n'est donc pas absorbée.

b. L'albédo de Vénus (0,70) est plus important que celui de la Terre (0,30). Cette différence vient du fait que l'atmosphère de Vénus est plus épaisse.

c. Le flux thermique par unité de surface réellement absorbé par Vénus est $F'' = (1 - 0,70) \cdot F' = 210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$\text{d. } \Phi_{\text{réémis par Vénus}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}} \text{ Donc : } \sigma \cdot T^4 = F''$$

$$\text{Donc : } T^4 = \frac{F''}{\sigma} = \frac{210}{5,67 \times 10^{-8}}$$

Soit $T = 247 \text{ K}$, ce qui correspond à $-26 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

e. Vénus n'est pas un « corps noir » et l'écart constaté provient aussi de l'existence de l'effet de serre d'autant plus accentué que l'atmosphère de Vénus est dense.

3. Vénus et la Terre possèdent une atmosphère. Elles ont toutes deux un albédo et sont soumises à l'effet de serre. Ces phénomènes sont accentués pour Vénus dont l'atmosphère est dense.

39 1. a. La courbe obtenue a l'allure d'une exponentielle décroissante.

b. La température ambiante est de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

c. La température initiale du café est de $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Au bout de 10 min, sa température est de $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Au bout de 30 min, elle est de $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. a. La solution générale de l'équation différentielle est :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{\text{amb}}$, donc $B = T_{\text{amb}}$.

À $t = 0 \text{ s}$, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{\text{amb}}$, donc $A = T_0 - T_{\text{amb}}$.

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{\text{amb}}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{\text{amb}}$.

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (100 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$$

$$\text{Donc : } T(t) = 80 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20.$$

$$\text{b. } T(20) = 30, \text{ donc } 80 \times e^{-\gamma \times 20} + 20 = 30.$$

$$\text{Donc } e^{-20\gamma} = \frac{1}{8} \text{ soit } -20\gamma = \ln \frac{1}{8}.$$

$$\text{Donc } \gamma = \frac{\ln 8}{20}.$$

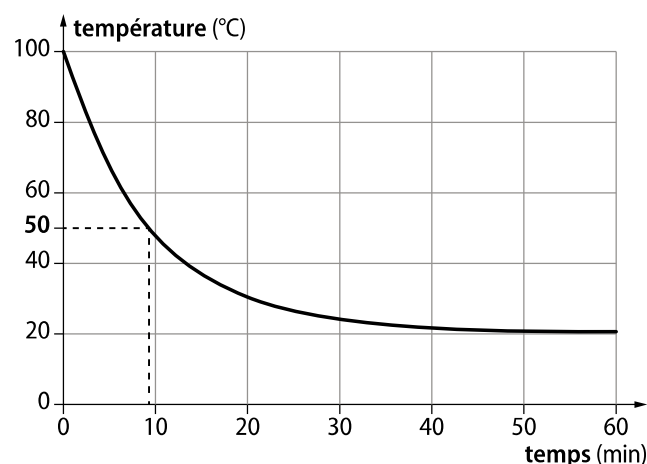
c. On cherche t pour lequel on a $T(t) = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\text{Donc } 80e^{-\frac{\ln 8}{20} \cdot t} + 20 = 50. \text{ Donc } e^{-\frac{\ln 8}{20} \cdot t} = \frac{3}{8}.$$

$$\text{Donc } -\frac{\ln 8}{20} \cdot t = \ln \frac{3}{8}.$$

$$\text{Donc } t = 20 \times \frac{\ln \frac{8}{3}}{\ln 8} = 9,4 \text{ min.}$$

Cette valeur est cohérente avec le graphique :



40 1. a. Le type de régression à choisir est l'exponentiel (il s'agit d'une exponentielle décroissante).

b. Il peut être judicieux de forcer ici l'ordonnée à l'origine, puisque la température initiale de l'eau chaude est connue. Sa valeur est de $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Expression générale de l'exponentielle décroissante :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{\text{amb}}$, donc $B = T_{\text{amb}}$.

À $t = 0 \text{ s}$, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{\text{amb}}$, donc $A = T_0 - T_{\text{amb}}$.

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{\text{amb}}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{\text{amb}}$.

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (70 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$$

$$\text{Donc } T(t) = 50e^{-\gamma \cdot t} + 20.$$

$$\text{On a } T(50) = 50 \times e^{-\gamma \times 50} + 20 = 40.$$

$$\text{Donc } e^{-\gamma \times 50} = \frac{2}{5}.$$

$$-50\gamma = \ln \frac{2}{5}.$$

$$\gamma = \frac{\ln \frac{5}{2}}{50} \approx 0,018.$$

$$\text{Donc } T(t) = 50 \cdot e^{-0,018 \cdot t} + 20.$$

41 Il existe un écart entre le modèle retenu et la courbe expérimentale car il existe une incertitude sur la mesure de la température et sur la mesure du temps.

Les valeurs correspondant aux grandeurs de l'expression du modèle $T(t) = (T_0 - T_{\text{env}}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{\text{env}}$ doivent encore être ajustées (le logiciel le permet d'après la copie d'écran)

42 Exemple d'exposé oral

L'acquisition expérimentale qui a été faite est un suivi d'évolution de la température d'un **système** au cours du temps. La courbe en exponentielle décroissante traduit un refroidissement (de $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ initialement à $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) qui suit la **loi de refroidissement de Newton**. La température initiale du système est de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et la **température du thermostat** est de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pour obtenir une telle acquisition, il est possible d'utiliser une sonde de température reliée à un dispositif d'acquisition lui-même relié à un ordinateur muni d'un tableur-grapheur. Pour obtenir un thermostat à $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, on peut utiliser une eau glacée.

Si la température du système diminue, cela signifie que le système perd de l'énergie interne (les énergies cinétiques microscopiques diminuent car l'**agitation thermique** diminue). Comme il n'y a pas de force qui travaille ici, cette énergie interne est perdue, d'après le **premier principe de la thermodynamique**, sous forme d'un **transfert thermique**

vers le thermostat. Ce transfert thermique se fait par **conduction** (il n'y a pas de déplacement de matière).

L'équation différentielle qui régit l'évaluation observée est du type :

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\gamma \cdot (T(t) - T_{th}), \text{ avec } \gamma \text{ constante.}$$

La solution générale de cette équation différentielle est :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$.

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (22 - 0) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 0$$

Donc $T(t) = 22e^{-\gamma \cdot t}$.

On a $T(1) = 22e^{-\gamma} = 8,5$.

$$e^{-\gamma} = \frac{8,5}{22}$$

$$\gamma = \ln \frac{22}{8,5}$$

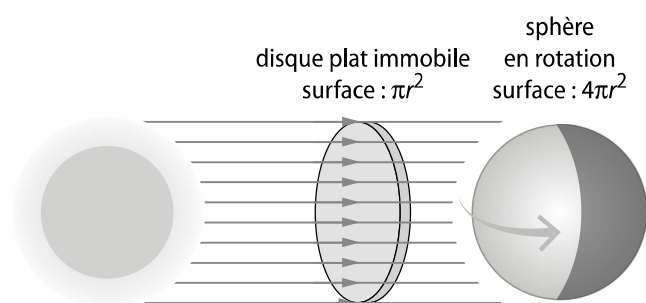
$$\gamma = \ln \frac{22}{8,5} = 0,95$$

Donc $T(t) = 22e^{-0,95 \cdot t}$.

43 Exemple d'exposé oral

• *Détermination théorique de la température moyenne terrestre*

Le flux thermique reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F = 1\,368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$$\Phi = F \cdot \text{surface}(\text{disque}) = F \cdot \text{surface}(\text{Terre})$$

$$\text{Donc } F \cdot \pi \cdot r^2 = F \cdot 4\pi \cdot r^2$$

$$\text{Donc } F' = \frac{F}{4} = 342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface d'un objet et la température de l'objet considéré comme un « corps noir », objet

idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit :

$\sigma \cdot T^4 = F'$, où σ est la constante de la loi de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :

$$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$$

$$\text{Donc } \sigma \cdot T^4 = F'$$

Soit $T = 279 \text{ K}$, ce qui correspond à 6°C .

• *Paramètres à intégrer au modèle pour s'approcher de la valeur réelle :*

Cette valeur diffère de la valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : elle réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit. La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0,30$.

De plus, les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol : c'est l'effet de serre. L'effet de serre est un phénomène naturel de réchauffement d'une planète, provoqué par des gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.

■ Développer ses compétences ■ p. 417

44 > Questions préliminaires

$$1. \Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$$

$$\Delta U = 1,0 \times 1,9 \times 4,18 \times (-1) = -8 \text{ kJ.}$$

2. D'après les résultats de l'expérience, le système {cruche + eau} a perdu $(3\,550 - 3\,300) \text{ g}$ en 6 h. Donc la valeur de la masse d'eau du système qui se vaporise au cours du temps en gramme par heure est de $\frac{3\,550 - 3\,300}{6} = 42 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

3. • Zone 1 : la température diminue.

L'énergie interne diminue. L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est plus importante que l'énergie reçue de l'extérieur par contact de l'air.

• Zone 2 : la température est constante.

L'énergie interne est constante. L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est égale à l'énergie reçue de l'extérieur par contact de l'air.

> Le problème à résoudre

Au bout d'une heure, 42 g d'eau se sont évaporés.

L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est donc :

$$Q_1 = m_{\text{eva}} \cdot L_V = 42 \times 10^{-3} \times 2,4 \times 10^3 = 1,0 \times 10^2 \text{ kJ}$$

Si l'on néglige l'énergie reçue de l'extérieur, alors l'énergie interne du système {cruche + eau} a diminué d'autant. Or, au bout d'une heure, la température du système a diminué de $21 - 16,5 = 4,5^\circ \text{C}$.

$$\Delta U = C_{\text{cruche}} \cdot \Delta T + \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$$

$$\Delta U = (C_{\text{cruche}} + \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}}) \cdot \Delta T$$

$$\Delta U = (2,1 + 1,0 \times 1,9 \times 4,18) \times 4,5 = 45 \text{ kJ}$$

ΔU est bien plus faible en réalité, donc on ne peut pas négliger l'énergie reçue de l'extérieur.

45 > Questions préliminaires

1. Conduction : transfert thermique dans un milieu matériel sans transport de matière.

Convection : transfert thermique dans un milieu matériel avec transport de matière.

Rayonnement : transfert thermique sans milieu matériel.

$$2. R_{\text{th}}(\text{toit}) = R_{\text{laine de chanvre}} + R_{\text{terre cuite}}$$

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

$$\text{Donc } R_{\text{th}}(\text{toit}) = \frac{0,100}{0,04 \times 115} + \frac{0,040}{0,60 \times 115} = 2,1 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

$$\Phi_{\text{toit}} = \frac{T_c - T_f}{R_{\text{th}}}$$

$$\text{Donc } \Phi_{\text{toit}} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{th}}} = \frac{19 - 4,0}{2,1 \times 10^{-2}} = 7,0 \times 10^2 \text{ W}$$

> Le problème à résoudre

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{\text{toit}} + \Phi_{\text{murs}} + \Phi_{\text{sol}} + \Phi_{\text{portes + vitres}}$$

$$\Phi_{\text{total}} = 7,0 \times 10^2 + 743 + 66,8 + 123 = 1,6 \times 10^3 \text{ W}$$

Afin de conserver une température constante dans l'habitation, la puissance moyenne du système de chauffage doit être égale au flux thermique moyen sortant de la maison.

Il faut donc avoir un système de chauffage de puissance $P = 1,6 \times 10^3 \text{ W}$.

On cherche la consommation énergétique en $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

La surface est de $S = 100 \text{ m}^2$. Le chauffage fonctionne 120 jours (donc $120 \times 24 \text{ h}$) par an.

Cette consommation représente 60 % de la consommation d'énergie annuelle.

$$\text{Donc } 0,60 \times E = \frac{P \cdot \Delta t}{S}$$

$$\text{Donc } E = \frac{P \cdot \Delta t}{0,60 S} = \frac{1,6 \times 10^3 \times 120 \times 24}{0,60 \times 100} = 77 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

La classe énergétique de la maison est donc B.

46 > Questions préliminaires

1. a. Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide donc, dans ce cas, du randonneur (33°C) vers l'air et le sol (15°C).

b. Il s'agit d'un transfert thermique par conduction. Il y a un contact entre le système (le randonneur) et l'extérieur (le sol et l'air). Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet de proche en proche sans transport de matière.

$$2. \text{ Surface du matelas : } S_{\text{matelas}} = 1,93 \times 0,62 = 1,2 \text{ m}^2$$

On peut estimer que le randonneur couché occupe la moitié du matelas, on retiendra donc $0,5 \text{ m}^2$ comme surface du randonneur en contact avec le matelas.

> Le problème à résoudre

Flux thermique Φ traversant le matelas « isotapis » :

$$\Phi = \frac{T_c - T_f}{R_{\text{th}}} = \frac{T_c - T_f}{\frac{e}{\lambda \cdot S}} = \frac{(T_c - T_f) \cdot \lambda \cdot S}{e}$$

$$\text{AN : } \Phi = \frac{(33 - 15) \times 0,03 \times 0,5}{1,1 \times 10^{-2}} = 20 \text{ W}$$

Le flux thermique traversant le matelas « thermoplus », dans les mêmes conditions d'utilisation, est de 40 W .

Donc $\Phi_{\text{thermoplus}} > \Phi_{\text{isotapis}}$.

Le matelas qui est le meilleur isolant est donc le matelas « isotapis ».

47 1. a. Le premier principe de la thermodynamique indique que si un système fermé au repos a son énergie qui varie, c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de travail (W) soit sous forme de transfert thermique (Q) :

$$\Delta U = Q + W$$

$$\text{Donc } \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} + \frac{W}{\Delta t}$$

L'équation différentielle traduit ce premier principe de la thermodynamique :

- le terme $\rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$ est lié au taux de variation de l'énergie interne du système (en W) ;

- le terme $-\alpha \cdot (T - T_p)$ traduit le flux thermique (en W) ;

- le terme P représente la puissance électrique (en W).

b. Quand la température est stabilisée :

$$\frac{dT}{dt} = 0 \text{ donc } -\alpha \cdot (T - T_p) + P = 0 \text{ donc } T - T_p = \frac{P}{\alpha}$$

D'après le graphe de gauche : $T - T_p = 40 \text{ K}$.

$$\text{c. } T - T_p = \frac{P}{\alpha} = \frac{96}{\alpha} = 40 \text{ donc } \alpha = \frac{96}{40} = 2,40 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}.$$

2. a. Le bilan énergétique est modifié, il n'y a plus d'échange d'énergie avec l'extérieur sous forme de travail (W).

$$\text{On a donc uniquement } \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = -\alpha \cdot (T - T_p).$$

Le terme $\rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$ est lié au taux de variation de l'énergie interne du système (en W).

Le terme $-\alpha \cdot (T - T_p)$ traduit le flux thermique (en W).

$$\text{Donc } \frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_p) \text{ avec } \gamma = \frac{\alpha}{\rho \cdot V \cdot c}$$

On retrouve la forme de la loi thermique de Newton.

b. La solution générale de l'équation différentielle est :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_p$, donc $B = T_p$.

À $t = 0$ s, $T = T_{\max}$, donc $T_{\max} = A + T_p$ donc :

$$A = T_{\max} - T_p$$

$$\text{Donc } T(t) = (T_{\max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_p$$

$$\text{c. } T(t) = (T_{\max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_p$$

$$\text{Donc } (T_{\max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} = T - T_p$$

$$\text{Donc } e^{-\gamma \cdot t} = \frac{T - T_p}{T_{\max} - T_p}$$

$$\text{Donc } -\gamma \cdot t = \ln(T - T_p) - \ln(T_{\max} - T_p)$$

$$\text{Donc } \ln(T - T_p) = -\gamma \cdot t + \ln(T_{\max} - T_p)$$

$$\text{On a bien } \ln(T_{\max} - T_p) = \ln 40 = 3,68$$

$$\text{Et on a donc } \gamma = 1,33 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

Donc :

$$\alpha = \gamma \cdot \rho \cdot V \cdot c$$

$$= 1,33 \times 10^{-2} \times 1\,000 \times 0,1 \times 10^{-3} \times 1\,800$$

$$= 2,39 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

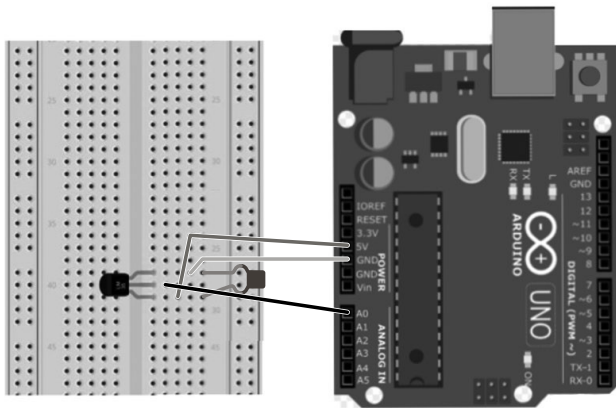
On retrouve la valeur précédente.

POUR PRÉPARER L'ECE

■ p. 420

1. Proposition de protocole expérimental

1.



2. Programme complété :

```
float volt; // Définition de la tension
float temp; // Définition de la température
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  valeur = analogRead(A0); //Mesure du cap-
  teur sur le port choisi (ici A0)
  tension = 5*valeur/1023; //Calcul de la
  tension
```

temp = tension/100; //Calcul de la tempéra-
ture : une tension de 10mV correspond à 1 °C
donc 1 V correspond à 100 °C.

Serial.println(temp); //Affichage de la
température

delay(1000); //Durée entre deux mesures
}

3. $\theta = 20$ °C. D'après le graphe qui présente les intervalles d'incertitude du capteur LM35, à 20 °C, l'intervalle est de $\pm 1,1$ °C. L'incertitude-type est donné par la moitié de la longueur de cet intervalle, donc l'incertitude est de 1,1 °C.

4. On peut utiliser le capteur de température LM35 relié à l'Arduino. Le programme de ce dernier permet d'afficher la température toutes les secondes (1 000 ms). On bascule les mesures dans un tableur grapheur qui permet d'afficher le graphe de l'évolution de la température en fonction du temps.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

1 et 2. On obtient une courbe exponentielle décroissante que l'on peut modéliser par une courbe de type : $T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Le logiciel nous donne ici $A = 40$; $B = 20$ et $\gamma = 0,03$.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. L'air initialement chauffé perd de l'énergie interne par transfert thermique avec l'extérieur.

2. La solution générale de l'équation différentielle est :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{\text{amb}}$, donc $B = T_{\text{amb}}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{\text{amb}}$, donc $A = T_0 - T_{\text{amb}}$

$$\text{Donc : } T(t) = (T_0 - T_{\text{amb}}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{\text{amb}}$$

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$$T(t) = (60 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$$

$$\text{Donc : } T(t) = 40 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$$

$$\text{On a } T(16) = 40 \cdot e^{-\gamma \times 16} + 20 = 45$$

$$e^{-\gamma \times 16} = \frac{25}{40} = \frac{5}{8}$$

$$16\gamma = \ln \frac{5}{8}$$

$$\gamma = \frac{\ln \frac{5}{8}}{16} = 0,029$$

$$\text{Donc } T(t) = 40e^{-0,029 \cdot t} + 20$$

3. L'expression obtenue est en accord avec la modélisation expérimentale.

4. Une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées peut provenir de la fiabilité du capteur et de l'Arduino utilisés.