

Avant d'aborder le chapitre

LES ACQUIS INDISPENSABLES

■ 1^{re} Enseignement de spécialité

■ 1^{re} Enseignement scientifique

■ Énergie mécanique

énergie mécanique (en J) → $E_m = E_c + E_p$

↑ énergie cinétique (en J)

↑ énergie potentielle (en J)

■ Théorème de l'énergie cinétique

somme des travaux des forces (en J)

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \sum W_{AB}(\vec{F})$$

↑ variation d'énergie cinétique (en J)

■ Puissance et énergie

énergie utilisée ou fournie par un dipôle (en J) → $E = P \cdot \Delta t$

↑ puissance utilisée ou fournie par le dipôle (en W)

↑ durée d'utilisation (en s)

■ Bilan radiatif

Le **bilan radiatif** terrestre se traduit par la différence entre l'énergie solaire reçue par la Terre et l'énergie émise vers l'espace. L'**albédo** et l'**effet de serre** ont une influence sur la température de la planète.

1 Premier principe de la thermodynamique

► Notion d'énergie interne

Lorsqu'on effectue une étude énergétique, il est nécessaire de définir l'objet sur lequel porte l'étude. Cet objet est appelé système.

L'**énergie interne** d'un système est son énergie propre. 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 (FIG. 1).

► Aspect microscopique

Étant donné la complexité d'appréhender le comportement de toutes les particules qui constituent un système, l'énergie interne n'est pas directement calculable. On pourra néanmoins déterminer sa variation.

L'énergie interne, notée U , ou sa variation notée ΔU , s'exprime, comme toute énergie, en **joule (J)**.

► Contributions microscopiques

Les énergies présentes au niveau microscopique sont les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles d'interactions microscopiques.

Les **énergies cinétiques microscopiques** sont liées à l'**agitation thermique** des particules qui constituent le système (FIG. 2). Elles augmentent avec la température du système.

EXEMPLE

Dans l'air, les molécules de dioxygène ont une vitesse de moyenne de $4,6 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à 0°C et de $5,0 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à 20°C . Leur énergie cinétique microscopique augmente avec la température.

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

EXEMPLE

Les interactions entre les nucléons d'un noyau atomique, les interactions entre les atomes d'une molécule ou les interactions entre les molécules contribuent à l'existence d'énergies potentielles d'interaction.

► Énergie totale d'un système

Un système peut aussi s'il est en mouvement posséder une énergie cinétique ou s'il est en hauteur une énergie potentielle de pesanteur.

L'**énergie totale** d'un système est la somme de son énergie cinétique, de son énergie potentielle de pesanteur et de son énergie interne :

$$\begin{array}{ccccc} \text{énergie totale (J)} & \rightarrow & E_{\text{tot}} = E_c + E_{\text{pp}} + U & \leftarrow & \text{énergie interne (J)} \\ & \nearrow & & \nwarrow & \\ & \text{énergie cinétique (J)} & & \text{énergie potentielle de pesanteur (J)} & \end{array}$$

Un système au repos à l'échelle macroscopique a une énergie macroscopique constante : $E_c + E_{\text{pp}} = \text{constante}$



FIG. 1 L'eau contenue dans cette casserole peut être considérée comme un système. Du fait de l'agitation des molécules d'eau et des interactions qui existaient entre elles, ce système possède une énergie interne.

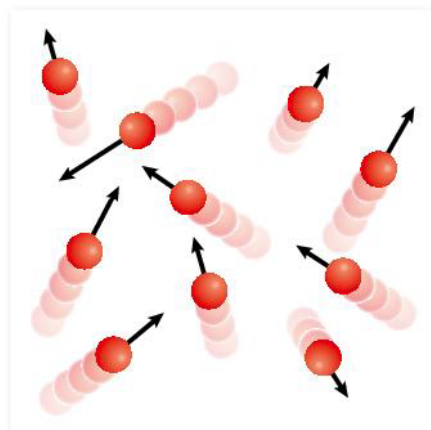


FIG. 2 L'agitation thermique désordonnée des entités microscopiques d'un système contribue à l'existence de l'énergie interne de celui-ci.

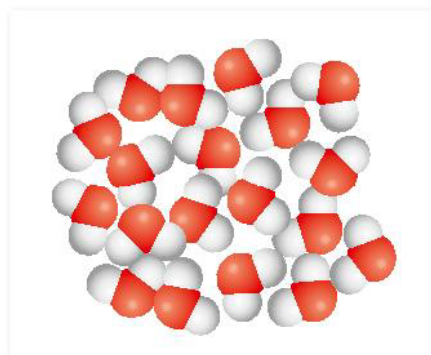


FIG. 3 Les interactions qui existaient au niveau microscopique entre les molécules constituant un système contribuent à l'existence de l'énergie interne de celui-ci.

La variation d'énergie totale d'un **système au repos à l'échelle macroscopique** est égale à sa variation d'énergie interne.

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

► Premier principe de la thermodynamique

On considère dans la suite que le système est au repos à l'échelle macroscopique et qu'il est **fermé** autrement dit qu'il n'échange pas de matière avec l'extérieur.

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)** :

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

Remarque. Le 1^{er} principe de la thermodynamique sert à effectuer l'étude thermique ou le bilan thermique.

Le terme ΔE_{totale} correspond à la variation de l'énergie du système, W et Q correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

Remarque. Quand les transferts d'énergie conduisent à une augmentation d'énergie du système on a $\Delta U > 0$ (FIG. 4).

2 Transferts et flux thermiques

► Capacité thermique

Un système peut stocker de l'énergie sous forme d'énergie interne et restituer ensuite cette énergie. La capacité thermique traduit cette possibilité.

La **capacité thermique C** d'un système est une grandeur qui traduit l'énergie qu'il faut transférer à celui-ci pour augmenter sa température de 1 kelvin.

Remarque. Comme il s'agit d'une variation de température, on peut raisonner directement sur des températures en degré Celsius.

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$$

► Transfert thermique

Un **transfert thermique Q** est un transfert d'énergie entre le système et l'extérieur qui se traduit par une variation de température ΔT du système :

$$\begin{array}{ccc} \text{transfert} & \rightarrow & Q = C \cdot \Delta T \leftarrow \text{variation de} \\ \text{thermique} & & \uparrow \\ \text{(J)} & & \text{température} \\ & & \text{(K)} \\ \text{capacité thermique} & \rightarrow & C = m \cdot c \\ \text{(J} \cdot \text{K}^{-1}\text{)} & & \uparrow \\ & & \text{masse (kg)} \end{array}$$

Pour système fermé au repos et incompressible, on a : $\Delta U = Q = C \cdot \Delta T$



FIG. 4 W_e correspond à l'énergie reçue du réseau électrique par une bouilloire et Q l'énergie fournie à l'eau par celle-ci. Pour la bouilloire : $W_e > 0$ et $Q < 0$.

► Modes de transferts thermiques

Il existe trois modes de transferts thermiques (qui peuvent coexister), selon la façon dont l'énergie est transférée.

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

EXEMPLE

Une casserole en contact avec une plaque électrique s'échauffe (FIG. 5). Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet de proche en proche sans transport de matière.

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

EXEMPLE

L'air d'une pièce peut se réchauffer à l'aide d'un radiateur placé au bord de la pièce par circulation des particules de l'air (FIG. 6). L'air chaud moins dense s'élève et l'air froid plus dense descend, le tout crée un mouvement de convection.

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

EXEMPLE

Le Soleil réchauffe la Terre à distance (FIG. 7).



FIG. 5 Le fond de la casserole s'échauffe au contact de la plaque électrique.

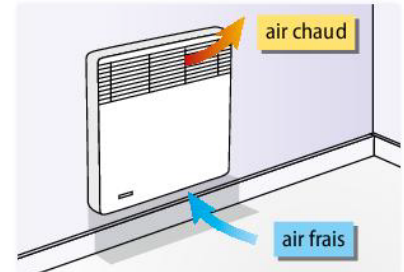


FIG. 6 Le principe d'un convecteur électrique repose sur le mouvement de convection de l'air.



FIG. 7 Le rayonnement du Soleil réchauffe l'atmosphère de la Terre.

► Sens de transfert thermique

Un transfert thermique ne peut se faire que **dans un seul sens**.

Le **sens du transfert thermique** ne peut se faire que d'un milieu qui a la température la plus élevée (la source chaude), vers un milieu qui a la température la plus faible (la source froide) (FIG. 8), jusqu'à ce que leurs températures soient égales.

EXEMPLE

Un café chaud laissé dans sa tasse va transférer son énergie au milieu environnant et donc se refroidir de façon irréversible.

► Flux thermique

Un transfert thermique peut se faire plus ou moins rapidement. Pour évaluer cette **vitesse de transfert**, on détermine le flux thermique.

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

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

Le flux thermique a les dimensions d'une puissance : on parle d'ailleurs de puissance thermique.

Remarque. Une habitation est bien isolée si les matériaux qui la constituent assurent un faible flux thermique, permettant ainsi de ralentir les transferts thermiques avec l'extérieur.

► Résistance thermique

Quand on coupe le chauffage d'une habitation en hivers, sa température va baisser d'autant plus rapidement que la différence de température entre

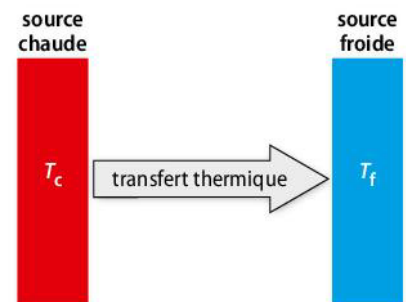


FIG. 8 Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide.

l'intérieur et l'extérieur est important. Cette baisse sera ralentie si les murs sont bien isolés (FIG. 9).

La **résistance thermique R** traduit l'opposition plus ou moins forte du système ou du matériau au flux thermique Φ . Plus elle est élevée, plus le flux thermique sera faible.

Le **flux thermique ϕ** est lié à la différence de température ΔT entre les deux milieux pour lesquels le transfert thermique se fait et à la résistance thermique R par la relation :

température de la
« source chaude » (J)

température de la
« source froide » (J)

flux thermique (W) → $\Phi = \frac{T_c - T_f}{R_{th}}$ ← résistance thermique (K · W⁻¹)



FIG. 9 On obtient une bonne valeur de résistance thermique quand on isole une habitation.

EXEMPLE

Pour maintenir dans un sauna une température de 70 °C à l'intérieur alors que la température extérieure est de 20 °C, il faut fournir une puissance de 1 500 W. On peut donc déterminer la valeur de la résistance thermique de la cloison dans ce cas : $R_{th} = \frac{\Delta T}{\sigma} = \frac{50}{1500} = 3,3 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$

Il existe une relation entre la résistance thermique d'un matériau et ses caractéristiques :

résistance thermique (K · m⁻¹) → $R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$

épaisseur de la paroi (m)

surface de la paroi (m²)

conductivité thermique de la paroi (W · m² · K⁻¹)

3 Deux lois thermiques

► **Loi de Stefan-Boltzmann**

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.

Loi de Stefan-Boltzmann

flux thermique par unité de surface (W · m²)

$F = \sigma \cdot T^4$

température du « corps noir » (K)

$\sigma = 5,67 \times 10^{-2} \text{ (W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$

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 **$F = 1\,368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$** (FIG. 10).

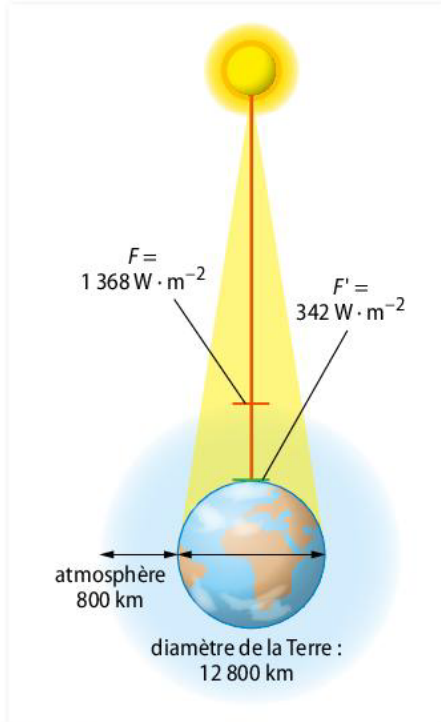
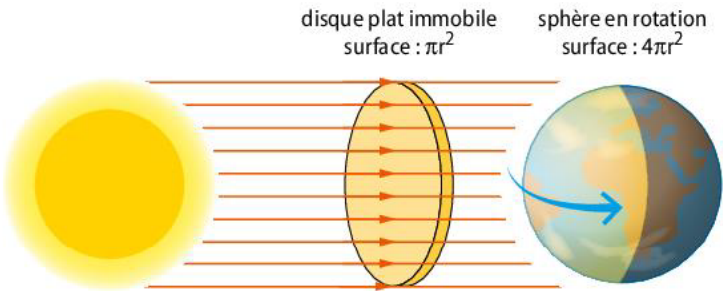


FIG. 10 Flux thermique reçu du Soleil par unité de surface.

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

$$\Phi = F_{\text{Surface disque}} = F'_{\text{Surface de la Terre}}$$

$$F \cdot \pi \cdot R_{\text{atm}}^2 = F' \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{\text{atm}}^2 \text{ donc } F' = F/4 = 342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égale au flux thermique émis par la Terre : $\Phi_{\text{reçu du Soleil}} = \Phi_{\text{émis par la Terre}}$

Donc : $\sigma \cdot T^4 = F'$; soit : $T = 279 \text{ K}$ ce qui correspond à 6°C .

Or la **température moyenne terrestre est de 15°C** . Cette valeur diffère de sa valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : la Terre réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit (FIG. 11), phénomène caractérisé par l'albédo.

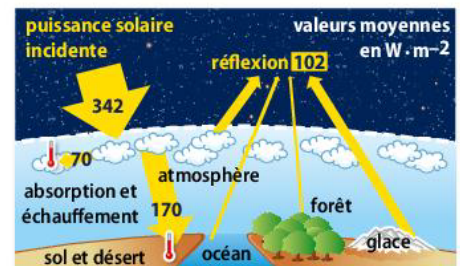


FIG. 11 Environ 70 % du flux thermique reçue est absorbée.



FIG. 12 Le flux thermique absorbée alimente l'effet de serre.

L'**albédo** correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchi et n'est donc pas absorbée. La **terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0,30$** .

Les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol (FIG. 12) conduisant à 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.

► Loi thermique de Newton

Un **thermostat** est un objet dont la température reste constante.

Le milieu extérieur peut souvent jouer le rôle de thermostat pour un système étudié.

Newton avait remarqué qu'un objet se refroidissait d'autant plus rapidement que la température entre ce corps et l'extérieur était importante.

La **loi de Newton** indique que le taux de variation de température d'un système, incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique, est proportionnel à la différence entre les température du corps T et celle extérieure qui joue le rôle de thermostat T_{th} :

$$\frac{dT}{dt} = -y \cdot (T - T_{\text{th}})$$

taux de variation de la température du système ($\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$)

constante (s^{-1})

température du thermostat (K)

température du système (K)

La loi de Newton est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant du type :

$$y' = a \cdot y + b$$

La résolution de ce type d'équation différentielle est la suivante :

$$y(x) = A \cdot e^{a \cdot x} + B$$

On en déduit que :

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

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

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

Donc :

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

L'évolution de la température se traduit par une fonction exponentielle décroissante qui tend vers la température du thermostat T_{th} (FIG. 13).

UN PONT VERS LES MATHS

Une équation différentielle de la forme $u' + ku = K$ (ou $du/dt + ku = K$) admet pour solution la fonction

$$u(t) = u_0 e^{-kt} + u_{\text{lim}}$$

La constante u_0 est déterminée grâce aux conditions initiales ($u(0) = u_0$).

La constante u_{lim} est la valeur de $u(t)$ quand t tend vers l'infini.

→ Fiche MATHS p. 533

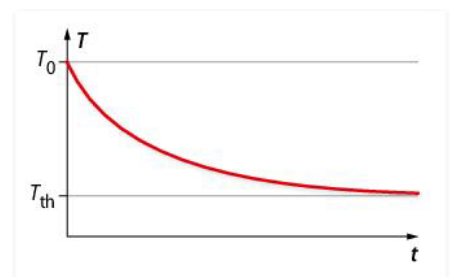


FIG. 13 Évolution de la température en fonction du temps d'un système au contact d'un thermostat.

1 Premier principe de la thermodynamique

Énergie interne d'un système

énergies cinétiques microscopiques (J)

énergie interne (J) → $U = E_{c\text{micro}} + E_{pp\text{micro}}$

énergies potentielles microscopiques (J)

Énergie totale d'un système

énergie cinétique (J)

énergie totale (J) → $E_{\text{tot}} = E_c + E_{pp} + U$

énergie potentielle de pesanteur (J)

système au repos $\Delta E_{\text{tot}} = \Delta U$

Premier principe de la thermodynamique

variation énergie interne du système (J)

travail (J)

transfert thermique (J)

$\Delta U = W + Q$

Dans le cas d'un système incompressible :

$$\Delta U = Q$$

2 Transferts et flux thermiques

Transfert thermique

transfert thermique (J) → $Q = C \cdot \Delta T$

variation de température du système (K)

capacité thermique du système (J · K⁻¹)

$C = m \cdot c$

masse (kg)

capacité thermique massique (J · kg⁻¹ K⁻¹)

Flux thermique

transfert thermique (J)

flux thermique (W) → $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$

durée du transfert (s)

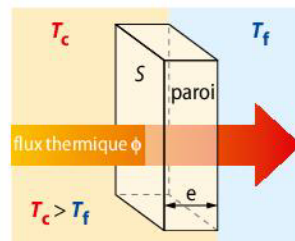
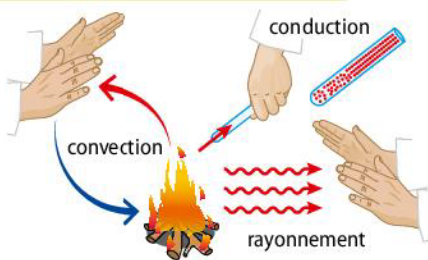
température de la « source chaude » (J)

température de la « source froide » (J)

flux thermique (W) → $\Phi = \frac{T_c - T_f}{R_{th}}$

résistance thermique du système (K · W⁻¹)

Modes de transfert thermique



épaisseur de la paroi (m)

résistance thermique (K · m⁻¹) → $R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$

surface de la paroi (m²)

conductivité thermique de la paroi (W · m⁻² · K⁻¹)

3 Deux lois thermiques

Loi de Stefan-Boltzmann

flux thermique par unité de surface (W · m⁻²) → $F = \sigma \cdot T^4$

température du « corps noir » (K)

$\sigma = 5,67 \times 10^{-2} \text{ (W · m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$

Loi thermique de Newton

taux de variation de la température du système (K · s⁻¹)

constante (s⁻¹)

température du thermostat (K)

température du système (K)

$\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th})$

Température moyenne terrestre théorique

$F_{\text{reçu du Soleil}} = 342 \text{ W · m}^{-2}$

albédo terrestre de 0,3

effet de serre

$T_{\text{terrestre moyenne théorique}} = 6^\circ \text{C}$

$T_{\text{terrestre moyenne théorique}} = 15^\circ \text{C}$

