

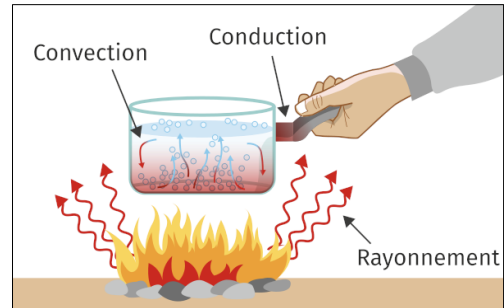
1. Mode de transferts de l'énergie thermique

• On distingue classiquement trois modes de transfert thermique :

↳ La **conduction** se fait à l'échelle microscopique, sans mouvement de matière. L'agitation thermique des particules se transmet de proche en proche. Elle est provoquée par la différence de température entre deux points d'un même corps.

↳ Lorsque des mouvements de fluides sont mis en jeu, on parle alors de **convection**. Celle-ci se superposant inévitablement à la conduction, le terme « conducto-convectif » est parfois utilisé.

↳ Enfin, le **rayonnement** électromagnétique transfère de l'énergie par absorption ou émission d'ondes électromagnétiques, y compris dans le vide.



2. Flux thermique à travers une surface

• On considère un système qui échange de l'énergie thermique, avec le milieu extérieur à travers une surface S .

Le flux thermique Φ échangé par le système à travers S , est égal à l'énergie thermique Q échangée par unité de temps :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

On dit aussi que c'est le débit d'énergie thermique à travers S .

Avec Q en joules (J) et Δt en secondes (s) le flux thermique Φ s'exprime en watts (W) Il est homogène à une puissance.

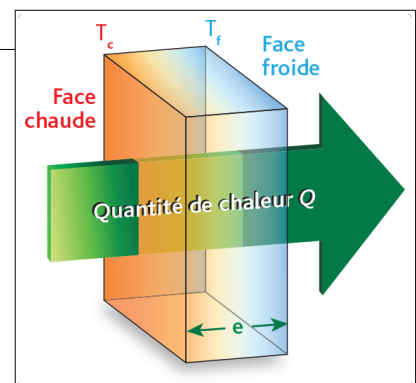
↳ Q étant une grandeur algébrique, le flux thermique l'est également.

3. Résistance thermique d'une paroi plane

• Lorsqu'on souhaite étudier le comportement d'une paroi, on peut la caractériser par sa résistance thermique, qui traduit sa capacité à s'opposer à un transfert thermique.

La résistance thermique d'une paroi séparant deux fluides à des températures différentes vaut :

$$R_{th} = \frac{T_{chaud} - T_{froid}}{\Phi}$$



• Un transfert thermique s'effectue toujours vers le corps froid (Conséquence du second principe)

↳ Comme la résistance thermique est positive le flux thermique Φ est celui échangé par le système froid.

4. Évolution temporelle de la température d'un système incompressible au contact d'un thermostat

4.1. Thermostat

Un thermostat est un système fermé de température constante notée T_{∞} .

La température d'un thermostat reste la même, quels que soient les transferts thermiques qu'il effectue avec un corps placé à son contact.

4.2. Loi de Newton

• On considère un système incompressible fermé à la température T , en contact avec un thermostat à la température T_{∞} . La surface de contact entre le système et le fluide est notée S .

Lorsque le mode de transfert thermique est la convection, le flux thermique Φ échangé par le système est proportionnel à la différence de température entre le corps et le milieu environnant. L'expression du flux thermique est :

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

↳ h est le coefficient d'échange convectif entre le système incompressible et le thermostat, l'un des deux étant fluide. Il s'exprime en watts par mètres carrés et par kelvin ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

La différence de température est en Kelvin (K) ou en ° Celcius (° C) Φ en watt (W) et S en mètres carrés (m^2)

4.3. Bilan d'énergie – Premier principe

• On étudie le refroidissement d'une tisanière en porcelaine, recouverte d'un couvercle, contenant une boisson. L'ensemble est initialement à la température $T_0 = 80 \text{ °C}$ et la température de la pièce est $T_{\infty} = 20 \text{ °C}$.

• Le système étudié est l'ensemble {tisanière + boisson} supposé incompressible et au repos macroscopique.

• Les échanges d'énergie avec le thermostat se font uniquement par transfert thermique convectif noté Q . Il n'y a pas de travail échangé, $W = 0$.

• La variation d'énergie interne entre deux instants vaut $\Delta U = C \times \Delta T$.

• Le premier principe permet d'établir l'expression de l'énergie thermique échangée entre deux instants :

$$\Delta U = W + Q, \text{ soit ici :}$$

$$\Delta U = 0 + Q \text{ et finalement :}$$

$$Q = C \times \Delta T.$$



4.4. Équation différentielle

• La définition du flux thermique entre le système et le thermostat est : $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$ d'où : $\Phi = C \times \frac{\Delta T}{\Delta t}$.

• La loi de Newton exprime ce même flux : $\Phi = h \times S \times (T_{\infty} - T(t))$ où T est fonction du temps t .

• Finalement, il vient : $C \times \frac{\Delta T}{\Delta t} = h \times S \times (T_{\infty} - T(t))$

• En réarrangeant les termes, en considérant deux instants suffisamment proches ($\Delta t \rightarrow 0$) et en utilisant la fonction dérivée, on obtient l'équation différentielle vérifiée par la température du système :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{h \times S}{C} \times T(t) = \frac{h \times S}{C} \times T_{\infty}$$

Cette équation est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre.

4.5. Résolution de l'équation

• On remarque que le coefficient $\frac{C}{h \times S} = \frac{C(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})}{h(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \times S(\text{m}^2)}$ est homogène à un temps en secondes (s) puisque $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$. Ce temps est noté τ et est caractéristique du système étudié $\tau = \frac{C}{h \times S}$.

L'équation allégée est donc : $\frac{dT}{dt} + \frac{T(t)}{\tau} = \frac{T_\infty}{\tau}$ avec $\tau = \frac{C}{h \times S}$.

• Les solutions de cette équation différentielle sont de la forme : $T(t) = K \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty$ où K est une constante d'intégration ([Voir ici pour les plus motivés](#))

• Les conditions initiales permettent de déterminer la valeur de la constante K en prenant $T = T_0 = 80^\circ \text{C}$ à l'instant initial $t = 0$. Il vient $K = T_0 - T_\infty$ et la solution de l'équation est alors :

$$T(t) = (T_0 - T_\infty) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty \text{ avec } \tau = \frac{C}{h \times S}$$

5. Bilan thermique du système Terre – Atmosphère

5.1. Corps noir (cf. Enseignement scientifique 1^{re})

• Un corps noir est un corps qui absorbe, quelle que soit la longueur d'onde, tout le flux thermique électromagnétique qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique des particules constituant le corps. Cette agitation thermique provoque la réémission du flux absorbé, à travers toute la surface du corps noir.

• Les caractéristiques de la réémission sont les suivantes :

↳ lorsque le corps noir est à l'équilibre, la totalité du flux reçu est réémis : $\Phi_{\text{émis}} = \Phi_{\text{reçu}}$.

↳ le flux réémis ne dépend que de la température du corps : $\Phi_{\text{émis}} = \sigma \times S \times T^4$ (Loi de Stefan-Boltzmann)

↳ le spectre du rayonnement réémis est continu, et ne dépend que de la température (Loi de Wien)

5.2. Flux thermiques reçus par la Terre

• Le Soleil émet (essentiellement aux longueurs d'ondes visibles) un flux thermique électromagnétique qui est transféré par rayonnement dans toutes les directions de l'espace.

• La Terre ne reçoit qu'une fraction de ce flux thermique : $\Phi_{\text{solaire reçu}} = 1,734 \cdot 10^{17} \text{ W}$. Cependant, l'intégralité de ce flux solaire n'est pas absorbé.

↳ Une fraction de ce flux est réfléchi par le système : $\Phi_{\text{solaire réfléchi}} = A \times \Phi_{\text{solaire}}$. Le coefficient de réflexion A est l'**albédo**, et sa valeur est de l'ordre de $A = 0,3$.

↳ Le flux effectivement reçu par la Terre vaut alors : $\Phi_{\text{solaire absorbé}} = (1 - A) \times \Phi_{\text{solaire reçu}}$.

• La Terre reçoit également un flux thermique électromagnétique (aux longueurs d'ondes infrarouges) provenant de l'atmosphère, noté $\Phi_{\text{atmosphérique}}$.

• La Terre se comporte comme un corps noir, et réémet les flux qu'elle reçoit :

$$\Phi_{\text{terrestre}} = \Phi_{\text{solaire absorbé}} + \Phi_{\text{atmosphérique}} \quad (1)$$

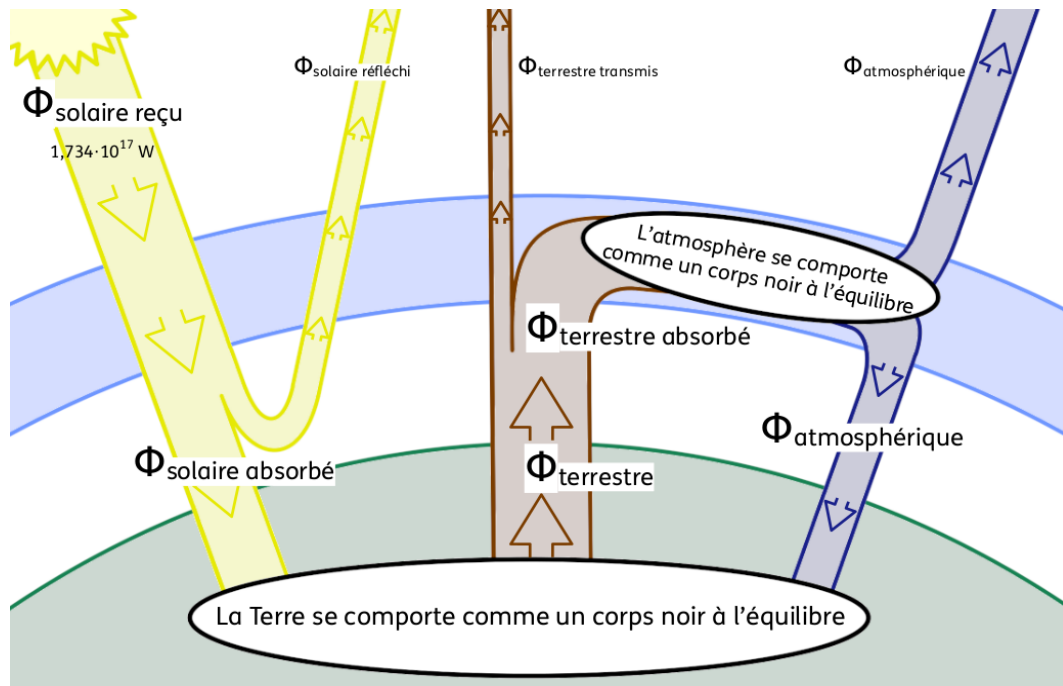
5.3. Flux thermique reçu par l'atmosphère

• Le flux thermique émis par la Terre atteint l'atmosphère.

↳ L'atmosphère en absorbe une partie : $\Phi_{\text{terrestre absorbé}} = \alpha \times \Phi_{\text{terrestre}}$. La valeur du coefficient d'absorption α est de l'ordre de $\alpha = 0,8$ et traduit l'effet de serre.

↳ L'autre partie est transmise à l'espace $\Phi_{\text{terrestre transmis}} = (1 - \alpha) \times \Phi_{\text{terrestre}}$.

• L'atmosphère se comporte comme un corps noir, et réémet le flux absorbé, moitié dans l'espace ; moitié vers la Terre : $\Phi_{\text{atmosphérique}} = \frac{1}{2} \Phi_{\text{terrestre absorbé}} \quad (2)$



5.4. Bilan

• En éliminant $\Phi_{\text{atmosphérique}}$ entre les équations (1) et (2), il vient : $\Phi_{\text{terrestre}} = \Phi_{\text{solaire absorbé}} + \frac{1}{2}\Phi_{\text{terrestre absorbé}}$.

↳ En remplaçant par leurs expressions, il vient : $\Phi_{\text{terrestre}} = (1 - A) \times \Phi_{\text{solaire reçu}} + \frac{\alpha}{2} \times \Phi_{\text{terrestre}}$.

↳ En réarrangeant les termes, on trouve : $\Phi_{\text{terrestre}} = \frac{1-A}{1-\frac{\alpha}{2}} \times \Phi_{\text{solaire reçu}}$.

↳ Le coefficient A est de nature à diminuer le flux thermique de la Terre : plus l'albédo est important moins la Terre émet de flux thermique. Les glaces polaires d'un blanc éclatant ont un albédo plus important que celui des sombres océans.

↳ Le coefficient α est de nature à augmenter le flux thermique de la Terre : plus l'absorption par l'atmosphère est grande, plus la Terre émet de flux thermique. α croît avec la concentration en GES.

$$\text{AN : } \Phi_{\text{terrestre}} = \frac{1-0,3}{1-\frac{0,8}{2}} \times 1,734 \cdot 10^{17} = 2,023 \cdot 10^{17} \text{ W.}$$

5.5. Application de la loi de Stefan

• La loi de Stefan permet de calculer une valeur T de la température de la Terre : $\Phi_{\text{terrestre}} = \sigma \times S \times T^4$.

Soit $T = \sqrt[4]{\frac{\Phi_{\text{terrestre}}}{\sigma \times 4 \pi R_T^2}}$. La constante σ vaut : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ uSI, et le rayon de la Terre est $R_T = 6,4 \cdot 10^6$ m.

$$\text{AN : } T = \sqrt[4]{\frac{2,023 \cdot 10^{17}}{5,67 \cdot 10^{-8} \times 4 \pi (6,4 \cdot 10^6)^2}}$$

$T = 288,5 \text{ K} = 15,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Ce qui est une très bonne approximation de la température terrestre pour un modèle aussi rudimentaire.